

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Técnica de controle de TCSC baseada em inferência
Fuzzy para aprimorar respostas dinâmicas do
sistema de potência

Giuseppe Scabello Silva

Itajubá, 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Giuseppe Scabello Silva

Técnica de controle de TCSC baseada em inferência
Fuzzy para aprimorar respostas dinâmicas do
sistema de potência

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do
Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Antônio Fanelli de Souza

Itajubá, 2023

Agradecimentos

Ao nosso Senhor Jesus Cristo que nos ensinou o caminho da salvação. A Nossa Senhora da Agonia que por nós intercede quando clamamos. Aos meus familiares, em especial aos meus pais que me apoiaram nesta jornada de retorno à universidade.

Ao professor Gabriel Fanelli, que me acolheu como seu orientado mesmo sem nos conhecer presencialmente, devido ao período pandêmico pelo qual todos nós passamos. Pela sua ajuda e orientação no desenvolvimento do curso, do artigo e desta dissertação.

Aos meus colegas engenheiros: Gustavo Fernandes da Costa; Mauro José Renó Ferreira; Pedro Henrique Naves Vasconcelos; Uchenna Godswill Onu; e Vinicius Braga Ferreira da Costa. Com os quais tive o prazer de desenvolver ideias, trabalhos e artigos durante estes dois breves anos do curso, tornando ambiente acadêmico muito mais aprazível.

E por fim a Universidade Federal de Itajubá e todos os seus dedicados servidores que, desde 1913, tornam possível este ambiente harmonioso para o progresso acadêmico e profissional dos alunos contribuindo para a construção e desenvolvimento de nosso grandioso país.

Epígrafe

“Certas realidades da vida só se veem com os olhos limpos pelas lágrimas”

(Papa Francisco)

Resumo

A expansão da rede de transmissão vem ocorrendo de forma significativa nos últimos anos. Visando a maximização do fluxo de carga, a estabilidade e a qualidade da energia nas linhas, e em todo o sistema elétrico de potência, dispositivos FACTS começam a ser empregados. Estes dispositivos atuam em favor da manutenção dos valores nominais dos parâmetros elétricos além de auxiliar o sistema na recuperação de seu estado estável após uma perturbação ou um colapso. Dispositivos FACTS do tipo Compensador Série Controlado por Tiristor (TCSC) são capazes de alterar a impedância da linha aprimorando o fluxo de potência além de contribuir para a estabilidade. Muitos estudos foram realizados, e pesquisas publicadas, para definir as melhores técnicas de controle dos dispositivos TCSC sendo que algumas delas estão em uso. Devido a grande diversidade de técnicas de controle, encontrar o método mais adequado a ser empregado, em um determinado sistema, pode ser algo não trivial. A presente dissertação trará duas técnicas, publicadas, de controle dos TCSC baseadas no modelo *lead-lag*, cujos parâmetros são definidos por meio de técnicas metaheurísticas do tipo Algoritmo Genético e do Enxame de Partículas. Os resultados encontrados nestas publicações serão simulados em ambiente Matlab/Simulink e confrontados com a aplicação da lógica Fuzzy com inferência linguística e composta por funções membro e regras simplificadas. Serão propostos três cenários de falha e os resultados das simulações comparados nas variáveis de velocidade angular, deslocamento angular, potência elétrica e impedância equivalente do sistema. Os dois modelos publicados e a lógica Fuzzy proposta conseguirão alcançar a estabilidade do sistema com resultados muito similares em todas as simulações. A grande diferença do emprego da lógica Fuzzy está em sua simplicidade de modelagem requerendo menos tempo, diferente das técnicas heurísticas que requerem maior tempo de modelagem e as vezes longas iterações para adequar os parâmetros.

Palavras-chave: Algoritmo Genético, Enxame de Partículas, FACTS, Fuzzy, Matlab, Simulink, TCSC.

Abstract

The expansion of the transmission network has been taking place significantly in recent years. Aiming to maximize the load flow, stability, power quality in transmission lines, and in the entire power system, FACTS devices begin to be employed. These devices work to maintain the nominal electrical parameters in addition to help the system to recover its steady state after a disturbance or even a collapse. Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC) is a type of FACTS devices and is able to change the line impedance improving power flow as well as contributing to system stability. Many studies have been carried out, and researches have been published, to define the best TCSC control techniques, some of which are already in use. Due to the great diversity of control techniques, finding the most appropriate method to be used in a given system is a non-trivial task. The present dissertation will bring two published techniques to control TCSC based on the lead-lag model, whose parameters are defined through metaheuristic techniques such as Genetic Algorithm and Particle Swarm. The results found in these publications will be simulated in a Matlab/Simulink environment and confronted with the Fuzzy logic application written with linguistic inference, simplified rules and simple membership functions. Three scenarios, with different faults, will be proposed and the simulations result and variables will be compared as angular velocity, angular displacement, electrical power and network equivalent impedance. The two published models and the proposed fuzzy logic will achieve stability with very similar results in all simulations. The big advantage in the use of Fuzzy logic is in its modeling simplicity, unlike the heuristic techniques that require much more modeling time and sometimes long iterations to achieve acceptable parameters.

Keywords: FACTS, Fuzzy, Genetic Algorithm, Matlab, Particle Swarm, Simulink, TCSC.

Lista de ilustrações

Figura 1 - Consumo total de eletricidade no Brasil, em GWh, entre os anos de 2000 e 2021	15
Figura 2 – Mapa do Sistema de Transmissão. Horizonte 2024.....	17
Figura 3 – Capacidade instalada de geração. *Dados coletados entre janeiro 2010 e agosto 2022	18
Figura 4 – Linhas de transmissão da rede de operação. *Dados coletados entre janeiro 2010 e agosto 2022.....	18
Figura 5 – Equipamentos de controle de reativo. *Os compensadores tiveram somados os seus limites de potências inferiores e superiores. **Dados coletados entre janeiro 2010 e agosto 2022	20
Figura 6 – Dispositivos FACTS tipo <i>shunt</i> . (a) <i>Thyristor-Switched Reactor</i> (TSR); e (b) <i>Thyristor-Switched Capacitor</i> (TSC)	23
Figura 7 - Dispositivos FACTS tipo série. (a) <i>Thyristor-Controlled Series Reactor</i> (TCSR) e (b) <i>Thyristor-Controlled Series Capacitor</i> (TCSC)	24
Figura 8 - FACTS <i>shunt</i> -série tipo <i>Unified Power Flow Controller</i> (UPFC) com a presença de dois <i>Voltage Source Converter</i> (VSC).....	25
Figura 9 – Dispositivo FACTS série-série tipo <i>Interline Power Flow Controller</i> (IPFC).....	26
Figura 10 – Subsistemas de um sistema elétrico de potência e seus respectivos controles	30
Figura 11 – Estados operativos do sistema de potência e suas interligações.....	31
Figura 12 – Sistema gerador x motor. (a) Representação do sistema e (b) Circuito elétrico equivalente.....	34
Figura 13 – Sistema gerador x motor. (a) Diagrama Fasorial e (b) Curva $P \times \delta$	35
Figura 14 – Resposta do ângulo do rotor a distúrbios transientes de naturezas diferentes.....	36
Figura 15 – Representação de um sistema radial simples.....	38
Figura 16 – Curva característica Potência x Tensão (PV)	39
Figura 17 – Características da curva PV em diferentes fatores de potência	39
Figura 18 – Estruturas dos controles estabilizadores (a) PD e (b) PI.....	41
Figura 19 - Estruturas dos controles estabilizadores (a) PID e (b) <i>Lead-Lag</i>	42
Figura 20 – Circuito equivalente do TCR.....	43
Figura 21 – Simplificação do circuito equivalente de um TCSC.....	44
Figura 22 – Sistema Máquina Única e Barramento Infinito (SMIB)	45
Figura 23 – SMIB com TCSC	46
Figura 24 – Modelo Phillips-Heffron para um SMIB com TCSC	49
Figura 25 – Modelo Simulink do sistema SMIB com TCSC	50
Figura 26 – Modelo Simulink para o cálculo dos parâmetros i_d , i_q , E'_d , E'_q e P_e	51
Figura 27 – Estrutura de controle tipo lag/lead para o TCSC.....	52
Figura 28 – Fluxograma MOGA	54
Figura 29 – Visualização da velocidade e localização, atual e futura, de uma partícula no PSO58	
Figura 30 - Fluxograma PSO	59
Figura 31 – Diagrama de blocos da lógica Fuzzy	60
Figura 32 – Comparativo das estruturas de controle em ambiente Simulink. (a) <i>Lead-lag</i> MOGA (b) <i>Lead-lag</i> PSO (c) Fuzzy	61
Figura 33 – Funções Membro de entrada e saída: (a) Velocidade Angular (ω); e (b) Variação do Ângulo ($\Delta\sigma$). Onde N – Negativo, P – Positivo, G – Grande, M – Médio, P – Pequeno;	63
Figura 34 – SMIB com TCSC e linha de transmissão em paralelo	65

Figura 35 – Velocidade angular, falta trifásica no barramento do gerador com carregamento de 0,8 [pu].....	66
Figura 36 – Variação do ângulo δ em graus no cenário 1.....	67
Figura 37 – Variação da potência elétrica em pu no cenário 1.....	68
Figura 38 – Variação da velocidade angular em pu no cenário 1.....	69
Figura 39 - Variação da reatância equivalente em pu no cenário 1.....	69
Figura 40 – Velocidade angular, falta trifásica no barramento do gerador com carregamento de 1,1 [pu].....	70
Figura 41 - Variação do ângulo δ em graus no cenário 2.....	71
Figura 42 - Variação da potência elétrica em pu no cenário 2.....	72
Figura 43 - Variação da velocidade angular em pu no cenário 2.....	72
Figura 44 - Variação da reatância equivalente em pu no cenário 2.....	73
Figura 45 - Velocidade angular, falta trifásica na linha com sua posterior remoção. Carregamento 1,0 [pu].....	74
Figura 46 - Variação do ângulo δ em graus no cenário 3.....	75
Figura 47 - Variação da potência elétrica em pu no cenário 3.....	75
Figura 48 - Variação da velocidade angular em pu no cenário 3.....	76
Figura 49 - Variação da reatância equivalente em pu no cenário 3.....	77

Lista de tabelas

Tabela 1 – Limites das variáveis desconhecidas.....	55
Tabela 2 – Parâmetros de controle do TCSC aperfeiçoados por MOGA	55
Tabela 3 – Limites de incertezas de cada variável e os parâmetros otimizados pelo PSO.....	59
Tabela 4 – Regras do sistema de inferência Mamdani.....	63
Tabela 5 – Comparativo das técnicas de controle e seus tempos de atuação.....	78

Lista de abreviaturas e siglas

- AG – Algoritmo Genético
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- BBO – *Biogeography Based Optimization*
- BEN – Balanço Energético Nacional
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- FACTS – *Flexible Alternating Current Transmission System*
- FCS – *Fuzzy Control System*
- FP – Fator de Potência
- IPFC – *Interline Power Flow Controller*
- LT – Linha de Transmissão
- MF – *Membership Function*
- MOGA - *Multi-Objective Genetic Algorithm*
- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
- PD – Proporcional Derivativo
- PI – Proporcional Integral
- PID – Proporcional Integral Derivativo
- PSO – *Particle Swarm Optimization*
- PSS – *Power System Stabilizer*
- SEP – Sistema Elétrico de Potência
- SIN – Sistema Interligado Nacional
- SMIB – *Single Machine Infinite Bus*
- SVC – *Static VAR Compensator*
- TCR - *Thyristor Controlled Reactor*
- TCSC¹ – *Thyristor Controlled Series Capacitor*
- TCSC² – *Thyristor Controlled Series Compensator*

TCSR – *Thyristor Controlled Series Reactor*

TSC – *Thyristor Switched Capacitor*

TSR – *Thyristor Switched Reactor*

ULTC – *Underload Tap-Changing*

UPFC – *Unified Power Flow Controller*

VSC – *Voltage Source Converter*

WOA – *Whale Optimization Algorithm*

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.1.1	<i>Sistema Interligado Nacional</i>	15
1.1.2	<i>Sistemas FACTS</i>	21
1.1.2.1	Dispositivos FACTS <i>shunt</i>	22
1.1.2.2	Dispositivos FACTS série.....	24
1.1.2.3	Dispositivos FACTS <i>shunt-série</i>	24
1.1.2.4	Dispositivos FACTS série-série.....	25
1.2	JUSTIFICATIVAS	27
1.3	OBJETIVOS.....	27
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	28
2	ESTABILIDADE DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	29
2.1	CONCEITUAÇÃO DA ESTABILIDADE SISTÊMICA	29
2.2	PROBLEMAS DE ESTABILIDADE.....	33
2.2.1	<i>Estabilidade Angular</i>	33
2.2.2	<i>Estabilidade de Tensão</i>	37
2.3	TÉCNICAS DE CONTROLE	40
3	ESTUDO DE CASO.....	43
3.1	<i>THYRISTOR CONTROLLED SERIES COMPENSATOR (TCSC)</i>	43
3.2	<i>SISTEMA SINGLE MACHINE INFINITE BUS (SMIB)</i>	45
3.3	MODELO SMIB COM TCSC NO AMBIENTE MATLAB/SIMULINK.....	50
3.4	TÉCNICA DO ALGORITMO GENÉTICO MULTIOBJETIVOS (MOGA)	53
3.5	TÉCNICA <i>PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)</i>	56
3.6	LÓGICA FUZZY	60
4	RESULTADOS	65
4.1	FALTA TRIFÁSICA NO BARRAMENTO COM BAIXO CARREGAMENTO.....	66
4.2	FALTA TRIFÁSICA NO BARRAMENTO COM ALTO CARREGAMENTO	70
4.3	FALTA TRIFÁSICA EM UMA LINHA COM CARREGAMENTO NOMINAL.....	73
4.4	ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS ESTUDADAS	78
5	CONCLUSÕES.....	79
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICE A: PROGRAMA EM MATLAB	83
	APÊNDICE B: INTERFACE GRÁFICA SIMULINK	86
	APÊNDICE C: LÓGICA FUZZY PROPOSTA	88

1 Introdução

Devido às dimensões continentais do Brasil tem-se um grande desafio em unir o ponto de geração de energia elétrica ao consumidor final. A grande extensão territorial nos traz a vantagem da maior disponibilidade energética além de uma diversidade de fontes de energia, especialmente as renováveis que geralmente poluem menos e possuem menor impacto ambiental na implantação. Mas a principal desvantagem da distância é justamente unir as grandes usinas geradoras de energia elétrica aos centros consumidores.

Para solucionar este problema faz-se necessário um Sistema Elétrico de Potência (SEP), que é uma extensa rede de equipamentos elétricos agrupados com a finalidade de interconectar usinas geradoras, linhas de transmissão, distribuidoras e consumidores de forma harmoniosa entregando energia ao ponto final com qualidade e confiabilidade.

A expansão do SEP vem ocorrendo regularmente e novos desafios estão surgindo para que sua ampliação e operação sejam viáveis. Este trabalho irá fornecer uma visão resumida, mas contextualizada, da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN) e a que passo o seu crescimento está ocorrendo nos últimos anos. Após esta breve análise, de forma complementar, uma apresentação dos dispositivos *Flexible Alternating Current Transmission System* (FACTS) será realizada para que sua relevância seja evidenciada nos mostrando os motivos de se tornarem uma tendência para o aprimoramento do SEP.

Com o aumento da aplicação dos sistemas FACTS, muitas técnicas de controle foram desenvolvidas, publicadas e utilizadas nas últimas décadas. E o emprego de cada técnica está relacionado ao problema localizado no SEP e qual dispositivo FACTS está sendo utilizado.

Esta dissertação irá realizar uma comparação dos atuais métodos de controle para o sistema FACTS série do tipo *Thyristor-Controlled Series Compensators* (TCSC) do tipo capacitor série. Além da comparação entre técnicas será proposto o emprego do sistema *Fuzzy Control System* (FCS) para que a lógica Fuzzy seja comparada com as outras técnicas. O principal objetivo será o de mostrar que a lógica Fuzzy requer menos tempo

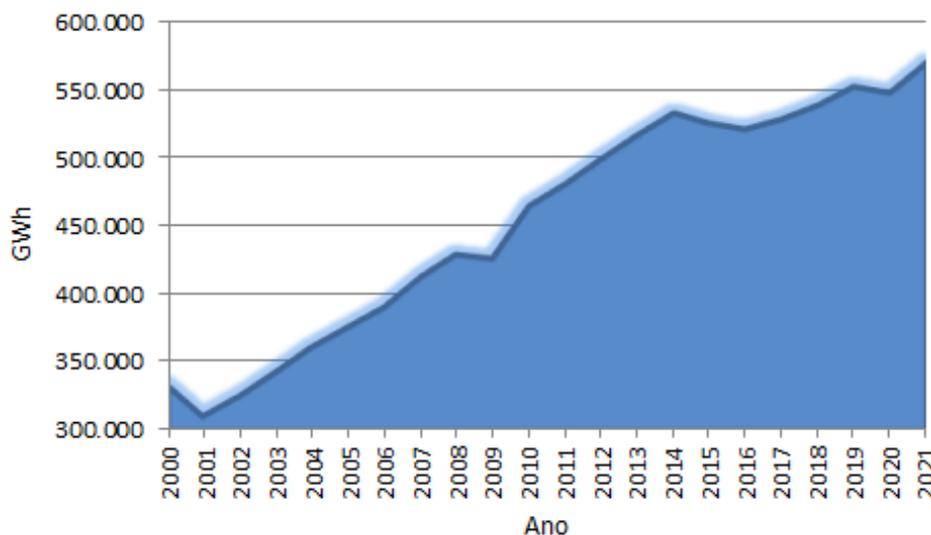
para modelagem e menor esforço computacional para encontrar uma resposta aceitável, e no fim apresentará resultados aos dos outros métodos apresentados.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Em virtude da intensificação do uso da energia elétrica, novos investimentos são necessários para a expansão do SIN seja em novas usinas, linhas de transmissão e/ou subestações. Todavia o potencial de regularização de grandes centrais hidrelétricas ou termelétricas, assim como grandes linhas de transmissão vêm reduzindo em consequência do esgotamento dos locais com viabilidade técnica, social, ambiental e econômica. Visto que não é mais razoável aceitar obras com grandes impactos socioambientais em favorecimento de poucos.

De forma consistente, o consumo final de eletricidade vem crescendo com o passar dos anos no Brasil, seja no setor industrial, agropecuário, comercial ou residencial. Segundo o Balanço Energético Nacional 2022 (BEN) em seu relatório síntese [1] no ano de 2021, o consumo de energia elétrica foi 4,2% superior quando comparado ao ano de 2020. Isto evidencia o caminho irreversível da expansão constante que a eletricidade vem tomando, frente às outras formas de energia. Conforme pode-se observar os dados históricos de consumo de eletricidade apresentados na Figura 1, o Brasil aumentou em 70% sua demanda por eletricidade nos últimos 21 anos.

Figura 1 - Consumo total de eletricidade no Brasil, em GWh, entre os anos de 2000 e 2021



Fonte - Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Séries históricas e matrizes Capítulo 2, tabela 2.28, acessado em agosto de 2022.

Este aumento do consumo elétrico é proveniente do crescimento econômico e do surgimento de novas tecnologias que estão modificando a forma com que se utiliza a energia. Estas mudanças visam o bem-estar, o conforto, a segurança, a redução de emissões entre outros benefícios. Aos poucos, por exemplo, nota-se o crescimento do interesse e a utilização dos meios de transportes eletrificados. Neste exemplo tem-se a redução do consumo direto dos combustíveis fósseis e biocombustíveis para o emprego da energia elétrica. Entretanto para que a energia elétrica esteja acessível ao consumidor final, é necessário que haja a disponibilidade energética para gerar a eletricidade além de um sistema confiável que seja capaz de entregar esta energia ao consumidor sem apresentar falhas, e é neste contexto que surge o Sistema Interligado Nacional, que é o alicerce do setor elétrico brasileiro.

1.1.1 SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

Constituído por quatro subsistemas, Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul, o Sistema Interligado Nacional tem predominância de geração elétrica pelas usinas hidrelétricas (53%) térmicas a gás e biomassa (21%) e eólica (11%) conforme BEN 2022 [1] formando assim a matriz denominada hidro-termo-eólica.

Toda a transferência de energia realizada entre os subsistemas do SIN é feita com a interconexão dos sistemas elétricos por meio das linhas de transmissão que constituem a Rede Básica. Esta transferência de energia, entre os subsistemas com a utilização da Rede Básica é de grande importância visto que a maior parcela da energia elétrica do sistema é de fontes renováveis e, por isso, podem ser intermitentes quando há secas prolongadas, ausência de biomassa ou mesmo dos ventos. Deste modo a interligação do sistema visa à cooperação entre as usinas geradoras superavitárias e deficitárias onde a energia é transferida entre as regiões atendendo da melhor forma o consumidor final evitando que um determinado subsistema fique sem energia elétrica.

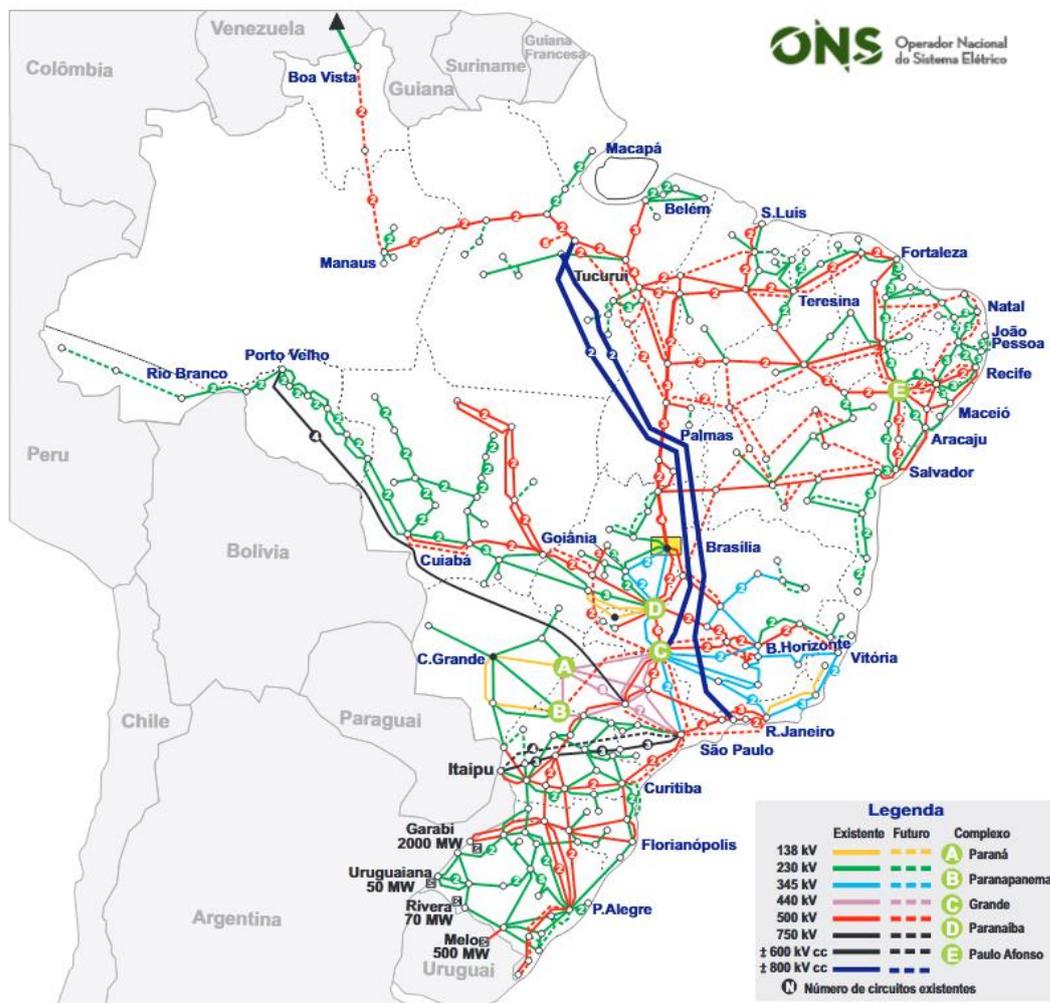
De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), nas regras dos serviços de transmissão, em seu módulo 2, que entrou em vigor no dia primeiro de agosto de 2022 [2], a Rede Básica é definida pela composição de linhas de transmissão, transformadores de potência e equipamentos de subestação em tensão igual ou superior a 230 [kV]. Estão incluídos também os transformadores de potência cuja tensão primária é igual ou superior a 230 [kV] e tensões no secundário e terciário inferiores a este valor. Estão excluídos desta definição redes em uso exclusivo de um determinado consumidor, ramais utilizados para importação/exportação de energia e barramentos com tensão inferior a 230 [kV].

Quanto à operação do SIN e por consequência da Rede Básica, cabe ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). O ONS é uma pessoa jurídica de natureza privada e sem fins lucrativos, criado pelo decreto Nº 5.081/2004 [3]. Conforme descrito em seu artigo primeiro o ONS é responsável em executar as atividades de coordenação e controle da operação da geração e da transmissão de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional e as atividades de previsão de carga e planejamento da operação dos sistemas isolados, sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Isto é, cabem à autarquia ONS, que é vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), realizar estudos e simulações envolvendo modelos da rede para que os equipamentos sejam coordenados e controlados de maneira adequada.

Devido a estas, e outras, atribuições legais, o ONS utiliza informações precisas e atualizadas do estado atual do SIN para que decisões acertadas de operação sejam tomadas com base na modelagem do sistema. Para uma melhor compreensão das

dimensões do sistema, na Figura 2 tem-se a apresentação do Mapa do sistema de Transmissão, com o horizonte de expansão 2024.

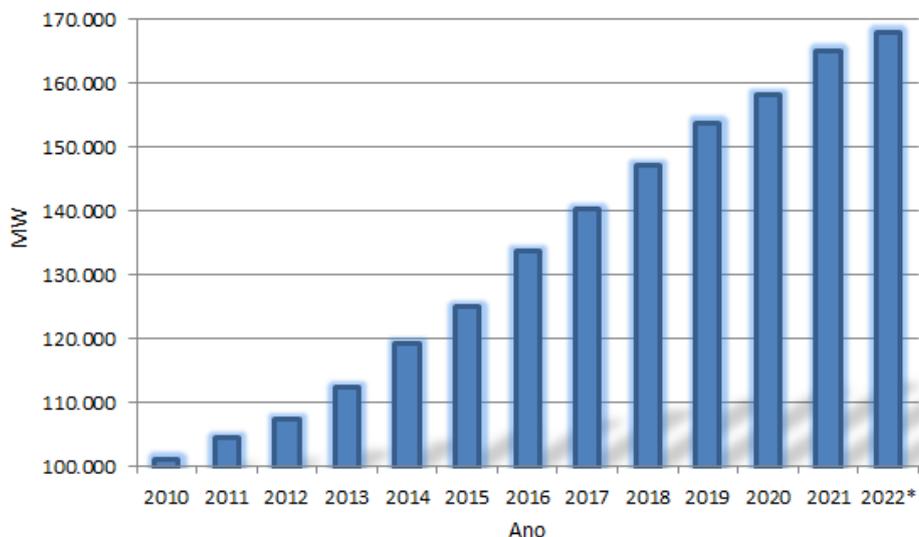
Figura 2 – Mapa do Sistema de Transmissão. Horizonte 2024



Fonte – Operador Nacional do Sistema Elétrico www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas acessado em agosto de 2022

Neste cenário compreende-se a importância do SIN e como a agência reguladora possui grande responsabilidade ao fiscalizar o bom andamento do sistema para viabilizar o desenvolvimento socioeconômico do país. Consoante ao que foi descrito anteriormente o ONS também é responsável pelo planejamento estratégico da expansão do sistema elétrico, dada a importância que a agenda de expansão da geração deva andar junto ao crescimento das linhas de transmissão. Nas Figuras Figura 3 e Figura 4 tem-se uma visão geral de como a geração e a transmissão estão crescendo no Brasil.

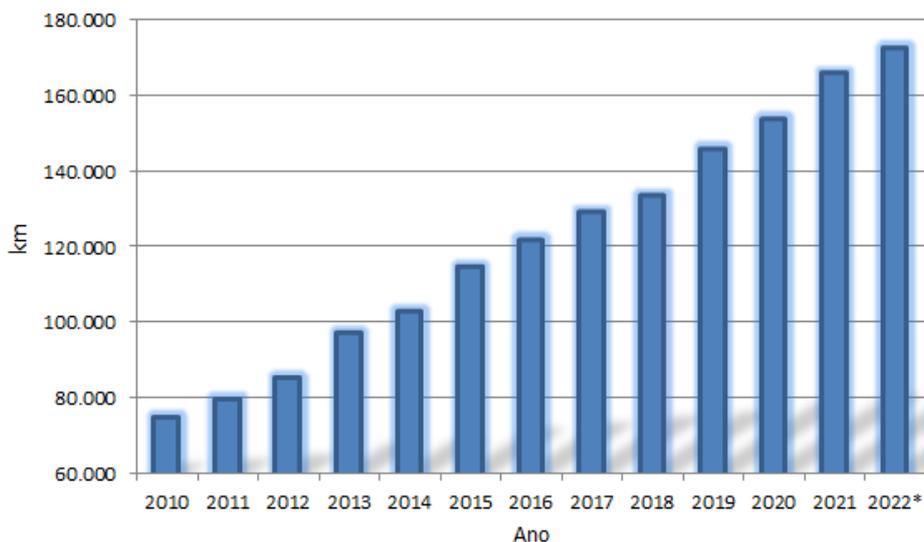
Figura 3 – Capacidade instalada de geração. *Dados coletados entre janeiro 2010 e agosto 2022



Fonte – Operador Nacional do Sistema Elétrico dados.ons.org.br/dataset/capacidade-geracao acessado em agosto de 2022

Analisando os dados que estão presentes na Figura 3, tem-se um aumento na capacidade instalada da geração elétrica de aproximadamente 65 % nos 12 anos de intervalo.

Figura 4 – Linhas de transmissão da rede de operação. *Dados coletados entre janeiro 2010 e agosto 2022



Fonte – Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) dados.ons.org.br/dataset/linha-transmissao acessado em agosto de 2022

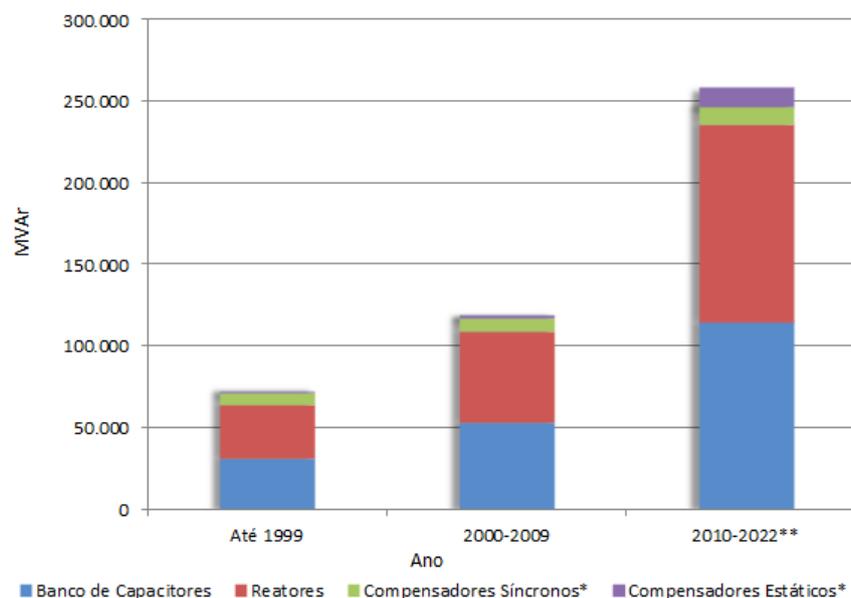
Analogamente, quando é analisado o aumento das linhas de transmissão com base nos dados apresentados na Figura 4, tem-se um expressivo acréscimo de 130% no mesmo período analisado na geração. Isto é, a malha de linhas de transmissão no Brasil

aumentou duas vezes mais quando comparado à capacidade instalada de geração. Neste ponto pode-se notar que os esforços de expansão do SIN estão se concentrando justamente na interligação das regiões do país. Também é possível chegar a esta conclusão quando se analisa a Figura 2 e se observa a pouca interligação do sistema na região norte em direção ao Acre e Roraima que ainda não se encontra no SIN sendo então dependente de energia de geradores locais e da importação energética da Venezuela. Ampliações consideráveis também estão previstas na região nordeste, por conta do aumento da oferta das energias renováveis, em especial nos estados do Ceará, Piauí e Bahia.

Uma questão importante a ser observado, quanto à expansão do sistema de linhas de transmissão, é a quantidade de interligações realizadas entre os barramentos para atender às diferentes cargas do sistema. O aumento dos quilômetros da malha assim como o número de nós (interligações) do sistema faz a complexidade de análise dos fluxos de potência aumentar, assim como definir quais os barramentos irão apresentar maiores oscilações de tensão e quais são os mais susceptíveis às falhas.

Por esta razão, outra atribuição do ONS é realizar, de maneira constante e em tempo real, o acompanhamento das medidas nas instalações do sistema de modo que avaliações do sistema elétrico sejam processadas e medidas de controle sejam tomadas para que a operação seja de forma correta. Uma das atribuições de controle do ONS tem por finalidade a estabilidade de tensão nos barramentos, que pode ser realizado por meio de modificação dos parâmetros de geração, como ajustes na excitação da máquina geradora, mudança no *tap* dos transformadores ou com a aplicação dos bancos de capacitores e/ou reatores. Na Figura 5 tem-se a capacidade instalada dos equipamentos de controle de reativo na rede sob supervisão do operador do sistema.

Figura 5 – Equipamentos de controle de reativo. *Os compensadores tiveram somados os seus limites de potências inferiores e superiores. **Dados coletados entre janeiro 2010 e agosto 2022



Fonte – Operador Nacional do Sistema Elétrico dados.ons.org.br/dataset/equipamento-controle-reativo acessado em agosto de 2022

Algumas observações importantes podem ser feitas ao se analisar a Figura 5. Houve um aumento aproximado de três vezes no fornecimento total de potência reativa ao sistema no intervalo de 23 anos. Nesta mesma série há um aumento considerável, mas linear, nos bancos de capacitores e reatores. Quanto aos compensadores síncronos, a potência instalada foi acrescida em 30 % mesmo período, praticamente se mantendo estável. E por fim tem-se a presença dos compensadores estáticos que no ano de 1999 representavam apenas 881 [MVar] e em agosto de 2022, 12.205 [MVar]. Estas informações mostram uma tendência no controle do fornecimento de reativo à rede, para um melhor controle de tensão, redução de perdas e maximização da transferência de potência. Compensadores estáticos possuem esta nomenclatura, pois não possuem partes móveis como os compensadores síncronos. São dispositivos construídos com componentes de eletrônica de potência, geralmente tiristores, e tem a vantagem da rápida resposta ao comando de controle do operador. Por serem dispositivos com tendência de ampliação de uso, uma contextualização sobre suas atribuições se faz necessária.

1.1.2 SISTEMAS FACTS

Na contextualização do sistema energético brasileiro, foi visto que a tendência do consumo de energia, em sua forma elétrica, sempre cresceu e a propensão é de que esta expansão se torne contínua com o passar das próximas décadas, especialmente em função da mudança de hábitos e comportamentos dos consumidores. Outro ponto importante, quanto a esta ampliação, é a dificuldade de regularização de novas obras por conta dos possíveis impactos socioambientais e das novas regulações vigentes. Por esta razão, uma alternativa temporária, à construção de novos empreendimentos, é ampliar o carregamento das máquinas geradoras de modo a fornecerem mais eletricidade assim como ampliar o carregamento nas linhas de transmissão. No entanto, o perigo destas operações reside exatamente no quesito confiabilidade. Ter um sistema próximo à sobrecarga é um risco que nenhum operador quer assumir. Pois incrementos adicionais de cargas podem resultar em instabilidade ocasionando perda de sincronia dos geradores, frente a um distúrbio, ou mesmo ao colapso de tensão do sistema resultando muitas vezes no apagão onde danos, por vezes irreversíveis, acontecem aos consumidores finais.

Empresas e pesquisadores vêm buscando soluções para o problema de fornecimento de energia elétrica, da qualidade e da estabilidade do sinal que é entregue, com o emprego de novas tecnologias, equipamentos e técnicas de controle de maneira a reduzir a necessidade de novos investimentos na expansão física do SEP.

Com o decorrer das últimas décadas novos equipamentos passaram a ser desenvolvidos e aos poucos começaram a integrar o SEP. Características e possibilidades até então inalcançáveis tornam-se realidade nas geradoras e transmissoras. Provavelmente um dos maiores avanços tecnológicos, que resultou nesta evolução, foi o emprego da eletrônica de potência. A eletrônica de potência possibilitou a idealização e criação dos Sistemas de Linhas em Corrente Alternada Flexíveis ou, em inglês, *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS). FACTS são equipamentos controlados que primeiramente foram concebidos para o melhoramento do fluxo de carga nas linhas de transmissão que operavam sobrecarregadas. Entretanto, viu-se que os FACTS também poderiam ser empregados para aprimorar a estabilidade do sistema, que em caso de alguma falta, seu estado estável de operação poderia ser retomado em

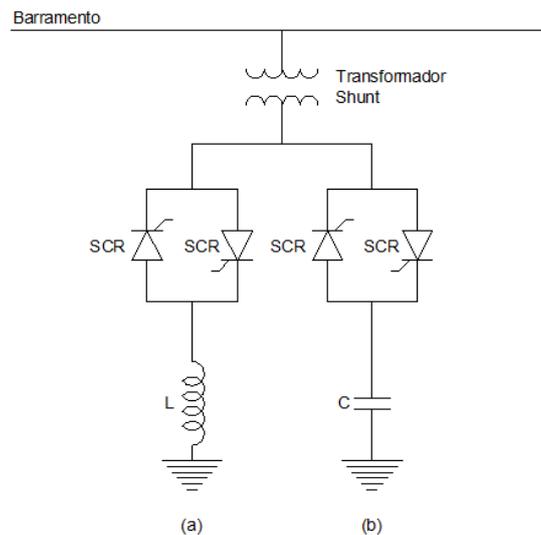
menor tempo com a aplicação de sistema de controle para amortecer o sinal diante destes distúrbios imprevisíveis [4].

A ideia básica por trás dos FACTS é a utilização da eletrônica de potência na alta tensão em conjunto com reatores para fornecer potência reativa à rede e tornar o sistema de potência controlado eletronicamente. Certamente uma das maiores vantagens dos FACTS é a possibilidade de prover potência ativa e reativa à rede de forma instantânea e escalonada, transferir potência entre barramentos e aprimorar o fluxo de potência na linha. Uma consequência destas características é a manutenção, ou ajuste, da tensão no barramento e a preservação da estabilidade. Dispositivos FACTS são classificados de acordo com seu tipo de conexão ao sistema elétrico. Isto é, podem ser do tipo *shunt*, série, *shunt-série* ou *série-série*. Cada tipo de conexão apresenta uma arquitetura diferente no posicionamento dos semicondutores e também apresenta resultados diferentes na operação. Serão apresentados a seguir os dispositivos do tipo *shunt*, série, *shunt-série* e *série-série*.

1.1.2.1 Dispositivos FACTS *shunt*

Dispositivos do tipo *shunt*, ou paralelo, funcionam como uma fonte controlada de corrente, permitindo maior fluxo da potência devido à melhoria do perfil da tensão. O aprimoramento da tensão é realizado pela manutenção do fator de potência, realizando um balanço na carga, diminuindo os harmônicos, controlando a potência reativa e provendo potência de forma contínua [5]. Há dois tipos de dispositivos *shunts*, o de compensação capacitiva e o de compensação indutiva. Na Figura 6 têm-se os esquemas de conexão destes dispositivos que podem ser do tipo capacitor ou indutor chaveado.

Figura 6 – Dispositivos FACTS tipo *shunt*. (a) *Thyristor-Switched Reactor* (TSR); e (b) *Thyristor-Switched Capacitor* (TSC)



Fonte – Autor, 2022

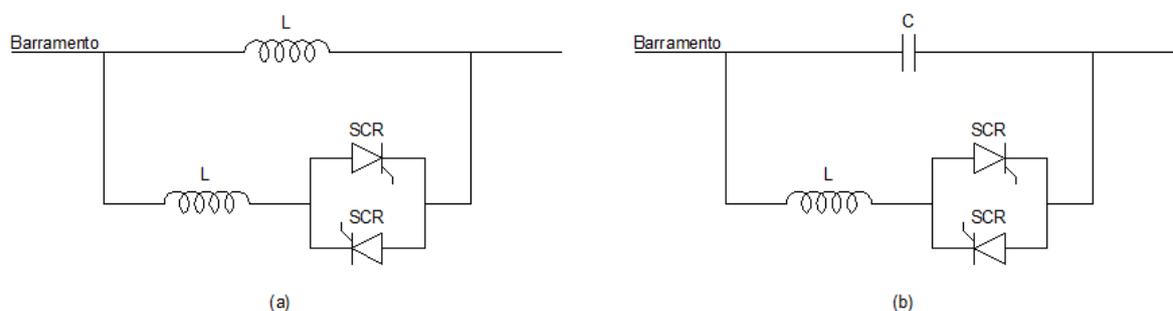
Os dispositivos apresentados na Figura 6 também são conhecidos pela nomenclatura Compensadores Estáticos de VAR ou, do inglês, *Static VAR Compensator* (SVC). Os dispositivos do tipo SVC aprimoram do fator de potência (FP). Quando a linha está carregada de forma indutiva, o capacitor shunt é inserido ao sistema, de forma escalonada parcial ou então em sua totalidade. Agora, quando a linha de transmissão está próxima à operação em vazio, há pouca corrente fluindo pelas linhas. Nesta situação a Linha de Transmissão (LT) começa a operar com comportamento capacitivo. Devido às suas características construtivas uma LT em vazio pode ser considerada um capacitor do tipo paralelo onde o dielétrico é o ar entre a linha e o solo. O principal malefício desta condição é o aumento da tensão no terminal receptor devido ao efeito Ferranti, que em determinados casos pode dobrar o valor nominal da tensão. Para evitar tal efeito indesejável o TSR busca equilibrar o reativo da linha evitando a sobretensão nos pontos terminais.

Em alguns dispositivos SVC, do tipo TSC, TSR ou ambos, é comum ter a presença de um filtro indutivo/capacitivo série, ligado em paralelo ao SVC. Este filtro tem o objetivo de reduzir os harmônicos produzidos pelo chaveamento dos tiristores.

1.1.2.2 Dispositivos FACTS série

Estes compensadores estão conectados em série com a rede de potência. Sua principal característica é realizar modificações na impedância da linha como se fosse indutor ou capacitor de valores ajustáveis. Toda compensação série funciona no princípio de modificar a reatância da linha, deste modo controlando o fluxo de potência na rede. Esta ação minimiza as perdas de potência ativa e reativa do sistema [5]. Na Figura 7 têm-se os dois tipos de conexões mais empregadas para os dispositivos de compensação série.

Figura 7 - Dispositivos FACTS tipo série. (a) *Thyristor-Controlled Series Reactor (TCSR)* e (b) *Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC)*



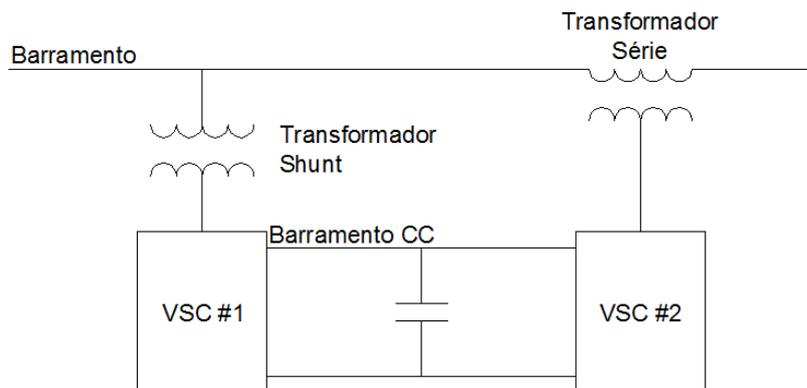
Fonte – Autor, 2022

Estes dispositivos podem também ser empregados para limitar a corrente de curto-circuito, eliminando a ressonância subsíncrona e amortecendo oscilações no sistema de potência. Por estas razões os dispositivos série, quando empregados na rede, têm grande impacto nos parâmetros e estabilidade.

1.1.2.3 Dispositivos FACTS *shunt-série*

Outra arquitetura possível nos dispositivos FACTS é a união dos dois modelos apresentados anteriormente criando o compensador *shunt-série*. Seu principal objetivo é compensar a corrente por meio de sua parte *shunt* enquanto o componente série compensa a tensão no barramento. Entre os compensadores *shunt-série* há um barramento em corrente contínua (CC) onde um capacitor é presente. A principal função desta conexão é permitir a troca de potência ativa e reativa entre os componentes do dispositivo [5]. Um modelo simplificado de um controlador de fluxo de potência unificado pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - FACTS *shunt-série* tipo *Unified Power Flow Controller* (UPFC) com a presença de dois *Voltage Source Converter* (VSC)

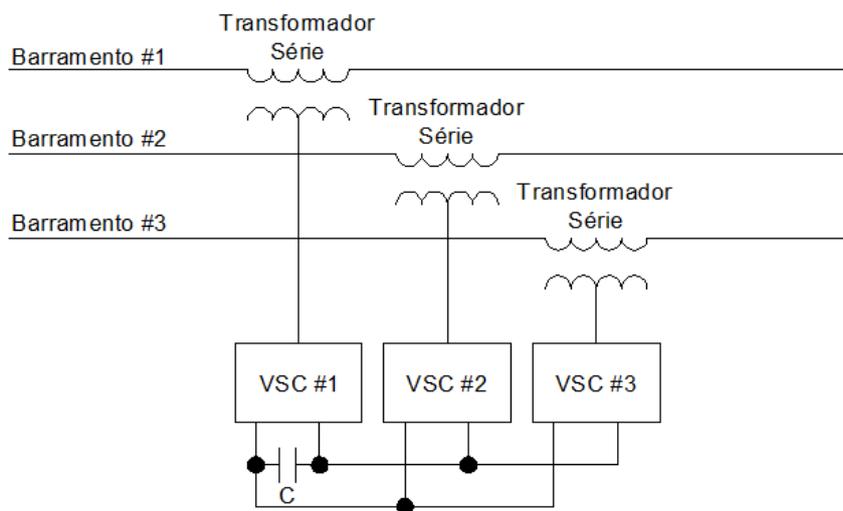


Fonte – Autor, 2022

Esta combinação de ligações permite o controle do fluxo de potência ativa e reativa. Também podem ser controlados para prover compensação de reativo sem o emprego de uma fonte externa.

1.1.2.4 Dispositivos FACTS série-série

Por fim o último tipo de conexão nos FACTS é do tipo série-série. Nestes modelos têm-se conexões simultâneas série em dois, ou mais, barramentos distintos. Em cada linha é colocado um VSC e os VSC são interligados por um barramento DC conforme o esquema de conexão *shunt-série* visto anteriormente, onde um capacitor está presente na linha CC. Na Figura 9 o esquemático simplificado de ligação de um Controlador de Fluxo de Potência Entrelinhas, ou do inglês *Interline Power Flow Controller* (IPFC) é apresentado.

Figura 9 – Dispositivo FACTS série-série tipo *Interline Power Flow Controller* (IPFC)

Fonte – Autor, 2022

Os dispositivos IPFC foram concebidos para realizar a compensação do fluxo de potência em sistemas de linhas múltiplas. Por meio do barramento CC, os conversores são capazes de transferir potência real entre as linhas do sistema de transmissão. Esta possibilidade faz com que haja equalização das potências ativa e reativa entre as linhas de modo a transferir potência de uma linha sobrecarregada para uma subcarregada, melhorando o escoamento de potência e aprimorando a tensão [6].

O sistema operando com zero perda, a soma das potências, saída e entrada, será igual a zero. As tensões nos barramentos podem ser diferentes e não irão interferir na transferência de potência, uma vez que os VSC irão controlar os parâmetros de cada ramo de acordo com a magnitude e ângulo da tensão injetada padronizando a tensão no barramento CC.

Por fim, nota-se que resultados alcançados no desempenho do sistema elétrico de potência estão diretamente relacionados ao uso de cada tipo de conexão e também do dispositivo empregado, como visto na contextualização dos FACTS. A arquitetura e os tipos de semicondutores utilizados são apenas uma parte destes dispositivos. Para o seu perfeito funcionamento no SEP é necessário desenvolver um sistema de controle de modo que a operação dos dispositivos ajude e não a prejudique o sistema. Por exemplo, que a potência reativa seja injetada na quantidade adequada e na hora certa. Por esta razão, muitos métodos de controle surgiram nos últimos anos e foram desenvolvidos

para cada um deles, assim é necessário que uma comparação seja realizada entre os métodos para que uma proposta seja feita.

1.2 JUSTIFICATIVAS

Estabelecer meios eficazes de operação do sistema é uma das grandes áreas de pesquisa e desenvolvimento da engenharia elétrica. Técnicas de controle começam a ser desenvolvidas e implantadas nos geradores para ampliar o fornecimento de potência elétrica ao mesmo tempo em que sua estabilidade sincrônica é mantida. Controle também é empregado em linhas de transmissão para maximizar o despacho de energia que pode ocorrer em um determinado circuito mantendo a tensão no barramento constante e a uma distância segura do ponto de colapso da rede.

Muitos métodos de controle já foram desenvolvidos, publicados e aplicados nos dispositivos FACTS. Esta dissertação tem o foco no desenvolvimento de uma nova proposta de controle para os dispositivos TCSC com base em lógica Fuzzy. Mas para que a nova proposta seja feita, é necessário criar um ambiente de simulações para que os métodos apresentados até hoje possam ser comparados em igualdade e então uma proposta condizente com a realidade seja apresentada. Assim, a justificativa deste trabalho é estabelecer uma comparação de alguns métodos existentes com a proposta do controle Fuzzy.

1.3 OBJETIVOS

Num primeiro momento será feito a revisão dos conceitos relacionados ao funcionamento dos dispositivos TCSC em um sistema elétrico reduzido. Uma revisão de artigos foi feita e dois métodos de controle do disparo dos tiristores foram selecionados e serão apresentados com seus respectivos trabalhos publicados. Os métodos encontrados na etapa anterior serão comparados com um modelo por lógica Fuzzy e simulados em ambiente Matlab e tendo seus resultados validados por meio do emprego de um modelo padronizado de testes no ambiente Simulink.

Uma comparação entre resultados será realizada. Nesta comparação, não somente a capacidade de controle será analisada, mas também, qual método possui a abordagem mais simples, qual é menos custosa em termos de processamento e também qual possui a modelagem mais rápida. Isto é importante para que fique explícito não somente os resultados do amortecimento do sinal com o uso do TCSC, mas também o esforço necessário para que novos modelos sejam apresentados.

Isto é relevante quando se tem em vista a grande variedade de parâmetros em um SEP. Buscar modelos simples e eficazes podem trazer ganhos expressivos na hora de realizar o controle do sistema. Os passos para que este trabalho seja desenvolvido de forma adequada estão listados na seção 1.4.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Primeiro Capítulo houve uma introdução dos conceitos básicos e da importância do SEP. Além da contextualização de problemas que são inerentes ao sistema. Apresentou-se a justificativa e os objetivos desta dissertação.

Para uma melhor compreensão dos avanços em controle dos Sistemas Elétricos de Potência, o Segundo Capítulo há uma breve revisão sobre estabilidade, quais as origens das perturbações e como estas influenciam o sistema. Isto é, para que haja uma proposta sensata dos possíveis controles a serem empregados.

No Terceiro Capítulo é apresentada a metodologia empregada nos modelos para que as análises sejam realizadas de forma igual entre as propostas. Também serão apresentadas em detalhes as técnicas selecionadas na revisão.

O Capítulo Quatro apresenta os resultados alcançados das simulações realizadas no ambiente MatLab/Simulink dos trabalhos publicados em revistas internacionais e a proposta deste trabalho.

E finalmente, o Capítulo Cinco apresenta as conclusões desta dissertação, quais os resultados encontrados com as diferentes técnicas de controle e qual delas é mais vantajosa nos quesitos de tempo de modelagem e resposta no sistema. Trabalhos futuros são propostos ao término desse capítulo.

2 Estabilidade dos Sistemas Elétricos de Potência

Quando se fala em estabilidade, a atenção tem que se voltar ao desempenho do sistema elétrico quando uma perturbação, pequena ou grande, ocorre. Perturbações têm natureza transitória e as classificadas como pequenas, normalmente, estão associadas às mudanças de cargas, o que é uma característica natural do sistema. Diferente das perturbações pequenas, as grandes podem ter sua origem na perda de um grande gerador, no curto-circuito de uma linha de transmissão ou mesmo na perda de uma ligação entre linhas de transmissão do sistema. Logo é importante entender os fatores que ocasionam a instabilidade para que uma classificação adequada seja feita a fim de propor a melhor solução de controle.

Por este motivo é conveniente apresentar os conceitos que envolvem a estabilidade de um sistema elétrico, como o controle pode ser empregado para solucionar os eventuais problemas e quais os métodos mais empregados atualmente.

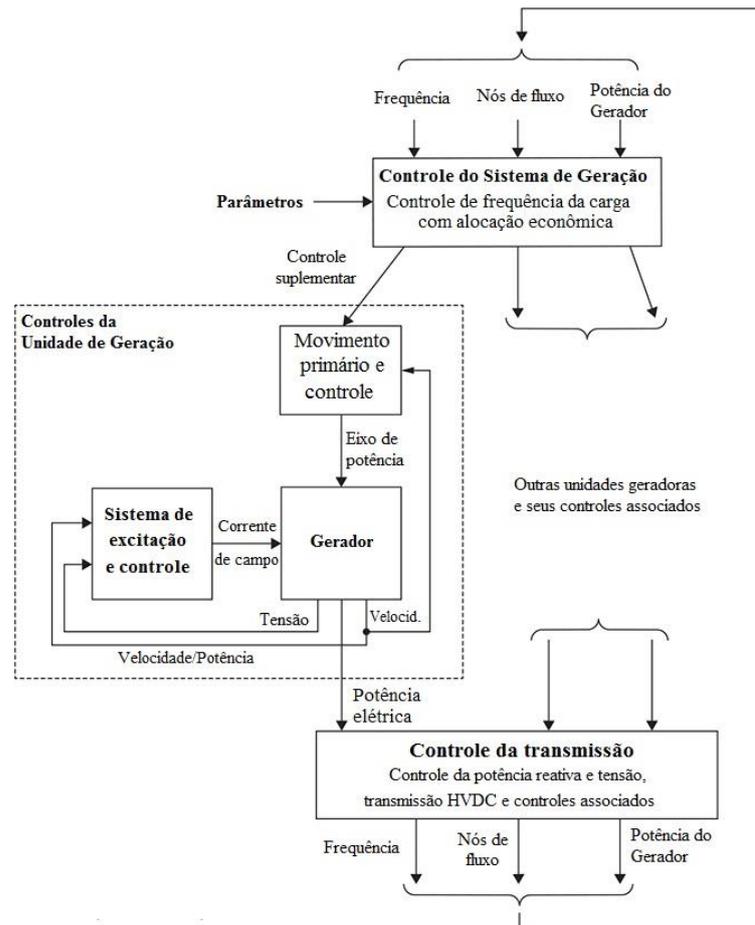
2.1 CONCEITUAÇÃO DA ESTABILIDADE SISTÊMICA

Estabilidade do sistema de potência pode ser considerada uma de suas propriedades. Sendo que a estabilidade é a capacidade do sistema de permanecer em equilíbrio quando em operação, ou recuperar o estado estável após a ocorrência de um distúrbio. Segundo Kundur [7] um sistema de potência propriamente projetado e operado deve atender aos seguintes requerimentos:

- O sistema deve ser capaz de atender continuamente mudanças na demanda da carga, seja esta ativa ou reativa. Diferente de outras formas de energia, a eletricidade não pode ser convenientemente armazenada em grandes quantidades. Por esta razão é necessário que uma reserva de potências ativa e reativas deva ser mantida sob controle por todo o tempo;
- O SEP deve suprir a energia com um custo financeiro aprimorado e com impactos ambientais mínimos;
- O fornecimento de potência deve manter valores padronizados com relação à constância na frequência, na tensão e na confiabilidade.

Para atender os requerimentos supracitados alguns níveis de controle, envolvendo múltiplos dispositivos, podem ser aplicados. Na Figura 10 tem-se identificado os vários subsistemas de um sistema elétrico de potência com seus respectivos controles. Os controles descritos na Figura 10 operam diretamente e individualmente nos elementos do sistema.

Figura 10 – Subsistemas de um sistema elétrico de potência e seus respectivos controles



Fonte – *Power System Stability and Control*, Segunda Edição [7]. Traduzido pelo autor

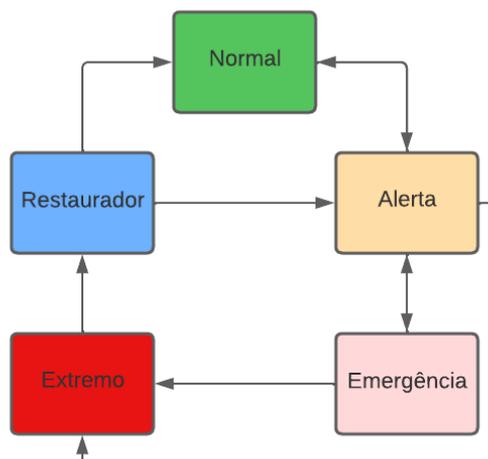
Em resumo o objetivo primário do controle da geração é realizar o balanço entre carga (e suas perdas) e a geração de modo a manter a frequência e o intercâmbio de potência entre os vizinhos.

Os controles descritos acima contribuem de forma considerável na operação do SEP, atuando na manutenção da tensão, da frequência e outras variáveis mantendo os seus limites cabíveis. Além da conservação dos valores nominais, sistemas de controle também operam significativamente na dinâmica do sistema elétrico aprimorando sua capacidade no gerenciamento dos distúrbios. Os objetivos do controle são dependentes

do estado de operação do sistema de potência. Sob condições normais de operação, o controle do sistema objetiva a operação da forma mais eficiente possível, mantendo tensão e frequência em seus valores nominais. Quando uma condição de operação não convencional ocorre (distúrbio), é esperado do controle seu comportamento de manutenção dos parâmetros nominais passe para uma condição de correção de modo que o sistema retorne à estabilidade.

No intuito de facilitar a compreensão das condições de um SEP Kundur [7] classifica os estados operacionais do sistema elétrico em cinco, que são: normal; alerta; emergência; extremo; e restaurador. Cada um destes estados apresenta suas características e a transição de um estado para o outro pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Estados operativos do sistema de potência e suas interligações



Fonte – *Power System Stability and Control*, Segunda Edição [7]. Redesenhado e traduzido pelo autor

No estado normal, todas as variáveis do sistema estão com seus valores nominais ou dentro das tolerâncias definidas pelo operador e nenhum equipamento está operando em sobrecarga. Sua operação neste estado é segura e é capaz de suportar certos distúrbios.

O estado de alerta é alcançado quando o nível de segurança for superior ou inferior a certos limites predefinidos, ou se tudo está normal, mas há possibilidade de uma perturbação por condições climáticas adversas. Nesse estado, as variáveis do sistema ainda se encontram na faixa aceitável. No entanto, o sistema encontra-se enfraquecido, a um nível em que uma contingência pode causar uma sobrecarga colocando a operação do sistema em estado de emergência. Se houver uma perturbação

severa, o estado do sistema poderá sair de sua situação de alerta direto para o estado extremo. Ações preventivas, como mudanças na geração, aumentando despachos de segurança, podem ser tomadas para retornar ao estado normal do sistema.

Se ocorrer uma perturbação suficientemente grave quando o sistema estiver no estado de alerta o sistema entrará em seu estado de emergência. Nesse estado, as tensões em muitos barramentos são baixas e/ou as cargas dos equipamentos excedem as classificações de emergência de curto prazo. O sistema ainda está operacional e pode ser restaurado ao estado de alerta iniciando ações de controle de emergência como a eliminação de falhas, controle de excitação, incremento de geração, redução de carga entre outros.

Caso as medidas citadas não forem aplicadas ou forem ineficientes, o sistema entrará em seu estado extremo. Resulta desta condição as interrupções em cascata e provavelmente o desligamento de uma parte significativa do sistema. Ações de controle visam a separação de partes do sistema e redução da carga para resguardar o restante do sistema de um apagão generalizado.

Por fim tem-se o estado restaurador que é onde ações de operação e controle serão tomadas para reestabelecer as conexões das cargas e da geração do sistema. Do estado restaurador dois caminhos são possíveis, a depender das condições do sistema, o primeiro, e o mais desejável, é retornar ao estado normal e a segunda alternativa é de alerta.

Conhecer os cinco estados operativos de um SEP nos traz a percepção da complexidade e das estruturas onde possíveis técnicas de controle podem ser desenvolvidas assim como as ações que um operador tem que tomar para manter o sistema mais próximo ao estado normal. Técnicas de controle serão empregadas diante quando um sistema estiver em seu estado normal ou de alerta e uma perturbação pequena ocorrer, a vantagem deste controle que o mesmo ocorrerá de forma rápida e automática com a atuação dos equipamentos do sistema elétrico. Quando o sistema se encontra em alerta, ou emergência, e ocorrer um distúrbio de grandes dimensões neste caso o operador deverá tomar atitudes para controlar o sistema, seja atuando na comutação de elementos e/ou refazendo despachos da geração.

Com os estados operacionais conhecidos, é necessário agora compreender quais as origens dos problemas de instabilidade no sistema elétrico, que pode ser pela falta de sincronia das máquinas geradoras ou pela instabilidade dos valores da tensão.

2.2 PROBLEMAS DE ESTABILIDADE

De maneiras distintas a instabilidade em um sistema de potência pode se manifestar e isto pode estar relacionado com a configuração ou como o SEP vem sendo operado. Problemas de estabilidade, tipicamente, são relacionados à operação síncrona dos geradores e aos níveis de tensão no barramento.

Como, em sua maioria, os grandes sistemas de energia dependem de máquinas síncronas para geração de energia elétrica, uma condição necessária para a operação satisfatória do sistema é que estas máquinas permaneçam em sincronia. Entretanto a falta de sincronia não é a única fonte de instabilidade. Um sistema simplificado que consiste em um único gerador síncrono alimentando uma carga através de uma linha de transmissão pode se tornar instável devido a um colapso da tensão originado na carga. Nesta situação, a máquina geradora não apresentará problemas de sincronismo, visto que é única, mas mesmo assim haverá instabilidade.

A seguir os dois tipos de instabilidade serão brevemente expostos para a compreensão das características de cada um e serão mostradas as suas diferentes origens.

2.2.1 ESTABILIDADE ANGULAR

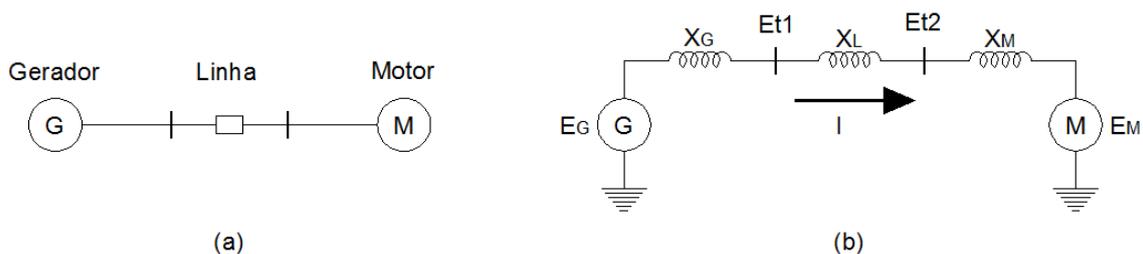
Máquinas operando como geradoras e em paralelo são muito comuns, seja dentro de uma mesma usina ou então entre usinas. Deste modo as máquinas síncronas estão interligadas entre si e mantém o sincronismo por meio de forças restauradoras que atuam entre elas. Esta mesma força pode criar uma tendência de aceleração ou desaceleração de uma ou mais máquinas em relação às outras. Em condições de carga e geração constantes tem-se o equilíbrio entre torque mecânico no eixo e o torque elétrico

de saída da máquina, quando em equilíbrio (regime permanente) sua velocidade de rotação permanecerá constante assim mantendo os parâmetros elétricos nominais.

Na ocorrência de um distúrbio na rede elétrica, o equilíbrio eletromecânico será desfeito resultando em uma aceleração ou desaceleração do rotor da máquina em concordância com a natureza da perturbação. Caso um gerador por um distúrbio, transitoriamente, operar com velocidade angular maior a posição de seu rotor estará adiantada em relação às outras máquinas. Quando isto ocorre parte da carga das máquinas lentas será transferida para a máquina mais rápida. Isto tende, naturalmente, a reduzir a diferença de velocidade entre máquinas, em busca do equilíbrio do sistema. Porém não é sempre que o equilíbrio será restabelecido, distúrbios de grandes proporções podem fazer com que a máquina acelere ou desacelere indefinidamente não sendo possível restabelecer seus parâmetros de operação por meios próprios.

No momento que um gerador opera, temporariamente, mais rápido a posição angular do seu rotor, comparada à geradora mais lenta, estará em avanço. Percebe-se então a importância da relação potência x ângulo e como esta afeta o comportamento da estabilidade das máquinas. Para uma melhor compreensão a Figura 12 (a) apresenta um esquema reduzido onde se tem duas máquinas síncronas conectadas por uma linha de transmissão com indutância X_L (resistência e capacitância desprezíveis) considerando um gerador (G) e um motor (M) síncronos.

Figura 12 – Sistema gerador x motor. (a) Representação do sistema e (b) Circuito elétrico equivalente



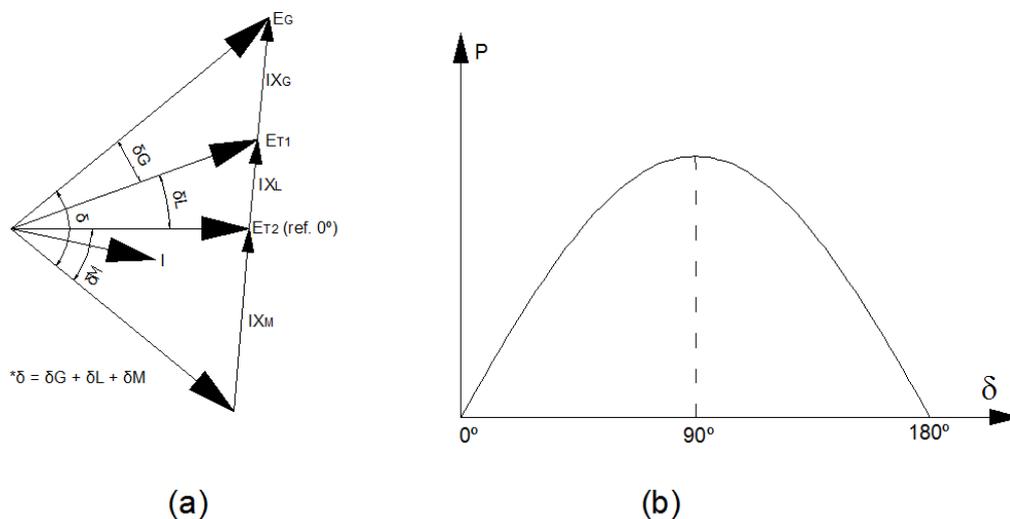
Fonte – *Power System Stability and Control*, Segunda Edição [7]. Redesenhado e traduzido pelo autor

Como se pode observar na Figura 12 (b) a corrente flui do gerador para o motor indicando a transferência de potência para o motor. Esta potência está em função da separação angular entre os rotores das máquinas e a diferença angular está relacionada aos três ângulos do sistema anteriormente apresentado, são estes ângulos:

- δ_G – ângulo interno do gerador;
- δ_L – diferença angular entre as tensões do gerador e do motor; e
- δ_M – ângulo interno do motor.

Um diagrama fasorial do circuito elétrico apresentado na Figura 12 (b) foi feito e está ilustrado na Figura 13 (a). Neste diagrama pode-se verificar a posição dos ângulos com base na referência do sistema, que neste caso é a tensão no barramento E_{T2} . O ângulo δ resulta da soma dos ângulos do gerador, da diferença angular gerador/motor e do ângulo do motor.

Figura 13 – Sistema gerador x motor. (a) Diagrama Fasorial e (b) Curva P x δ



Fonte – *Power System Stability and Control*, Segunda Edição [7]. Redesenhado pelo autor

Uma característica importante a ser observado ao se analisar o diagrama fasorial é que, como dito anteriormente, a potência a ser transferida ao motor síncrono está diretamente relacionada ao ângulo δ por ora apresentado. A partir desta observação percebe-se que a transferência de potência é uma relação não linear, isto é, o aumento do ângulo não necessariamente irá se traduzir em ganhos de potência transferida devido à natureza senoidal do equacionamento. A transferência de potência do gerador para o motor pode ser dada pela seguinte equação:

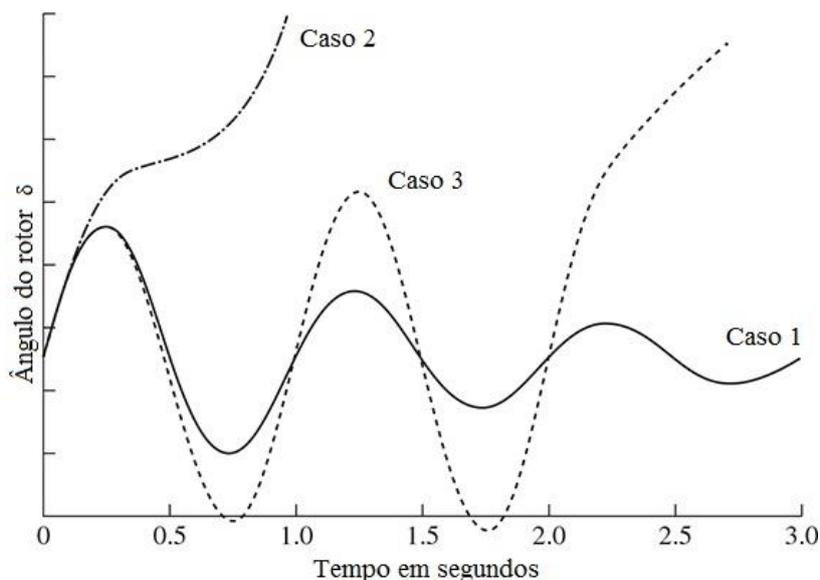
$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \text{sen} \delta$$

(1)

Da equação (1) onde X_T é a reatância equivalente, no caso do sistema apresentado na Figura 12 (b) tem-se que X_T é a soma das reatâncias X_G , X_L e X_M do circuito série proposto. Como mencionado anteriormente, percebe-se a presença do componente senoidal na equação de potência. O gráfico referente ao comportamento da potência em relação ao ângulo δ pode ser visto na Figura 13 (b) e quando $\delta = 0^\circ$ a potência é igual a zero e à medida que o ângulo aumenta a potência também aumenta, até chegar ao ponto de máxima transferência que é quando $\delta = 90^\circ$. Após este ponto aumentos no ângulo fará com que a potência seja reduzida, até zero quando $\delta = 180^\circ$.

Uma máquina geradora síncrona possui três possíveis repostas à presença de um distúrbio, uma resposta estável e duas instáveis. Na resposta estável, o ângulo do rotor tende a aumentar até certo limite, depois diminuir e com o passar do tempo a oscilação angular tenderá a zero, esta situação é o Caso 1 da Figura 14. O primeiro tipo de instabilidade angular ocorre quando o torque de sincronização é insuficiente e por isso o ângulo do rotor começa a aumentar de forma constante logo após a primeira oscilação, esta instabilidade é o Caso 2 da Figura 14. No terceiro caso a máquina não possui estabilidade na condição pós falta (com os novos parâmetros da rede) fazendo com que possua certa estabilidade na primeira oscilação, mas com o passar do tempo a excursão angular começa a ampliar (movimento contrário ao Caso 1) assim levando a máquina à instabilidade, esta situação está ilustrada no Caso 3 da Figura 14.

Figura 14 – Resposta do ângulo do rotor a distúrbios transientes de naturezas diferentes



Fonte – *Power System Stability and Control*, Segunda Edição [7]. Traduzido pelo autor

As análises de estabilidade transitória geralmente são realizadas no período de três a cinco segundos após o distúrbio. Em grandes sistemas de potência este período pode ser estendido para até 10 segundos de modo que oscilações entre áreas sejam detectadas. Os conceitos resumidos apresentados nesta subseção servirão de base para a análise dos resultados dos controles a serem apresentados no Capítulo 4. Na próxima subseção o tópico estabilidade de tensão será apresentado.

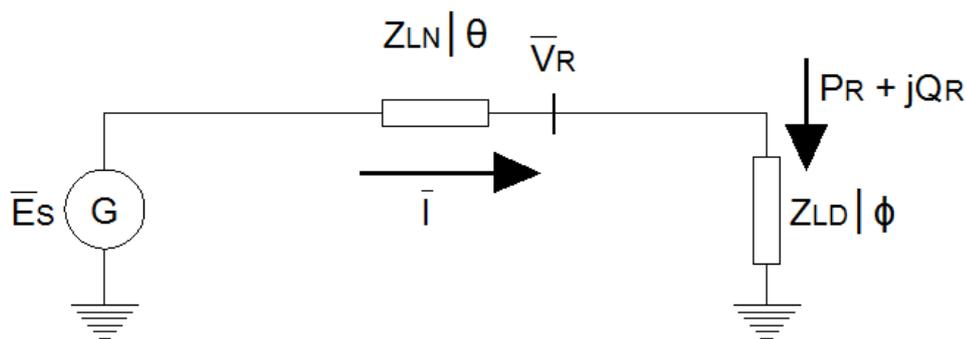
2.2.2 ESTABILIDADE DE TENSÃO

A manutenção dos valores de tensão, em níveis aceitáveis, nas barras de todo um sistema em operação normal, ou mediante a um distúrbio, é chamada de estabilidade de tensão. Instabilidade de tensão é, em essência, uma ocorrência localizada, entretanto seus efeitos podem se estender por todo o sistema. Ao se estender de uma barra para outra, a instabilidade pode progredir ao chamado colapso de tensão que é quando as características de baixa tensão alcançam boa parte do SEP.

Instabilidade de tensão pode ocorrer mediante a uma perturbação, elevação de demanda da carga ou quando há mudanças no sistema. Tais modificações podem implicar na redução constante e incontrolável da tensão em um ou mais barramento podendo resultar no colapso de tensão do sistema. Uma das origens de tal problema é a falha do sistema em fornecer potência reativa às cargas. Outra possibilidade que pode ocasionar instabilidade é quando o ângulo do rotor sai de sincronia, neste caso a queda gradual do sincronismo das máquinas, entre dois ou mais grupos geradores, pode se aproximar, ou exceder, 180° resultando em tensões muito baixas. Em contrapartida quedas sustentadas de tensão ocorrem quando a estabilidade angular não é um problema.

Uma das formas mais simples de se apresentar a instabilidade de tensão pode ser visto na Figura 15 onde há um sistema radial simplificado para a ilustração do fenômeno da instabilidade de tensão.

Figura 15 – Representação de um sistema radial simples



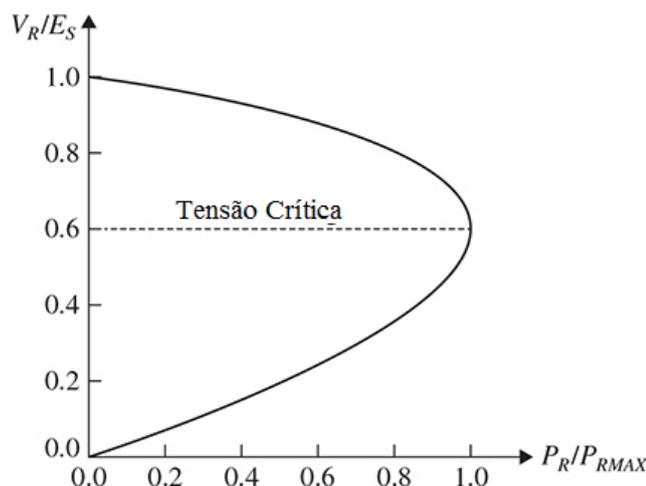
Fonte – *Power System Stability and Control*, Segunda Edição [7]. Redesenhado pelo autor

Do circuito apresentado na Figura 15 tem-se um gerador \bar{E}_S com tensão constante que fornece potência à carga Z_{LD} através da linha com impedância série Z_{LN} . Quando há um aumento de demanda, o valor de Z_{LD} irá diminuir resultando no aumento imediato de P_R . A potência P_R irá aumentar até atingir seu valor máximo para depois começar a diminuir. O máximo de potência possível transmitida ocorre quando a queda de tensão na linha é igual, em magnitude, a V_R e isto ocorre quando $Z_{LN}/Z_{LD} = 1$. Ao passo que Z_{LD} diminui a corrente I aumenta fazendo que V_R diminua.

Um alto valor de Z_{LD} comparado a Z_{LN} faz com que o aumento de I influencie sobre a diminuição de V_R e assim P_R aumentará rapidamente com a diminuição de Z_{LD} . Quando Z_{LD} se aproxima do valor de Z_{LN} a diminuição de I é pouco maior que a diminuição de V_R . No momento em que Z_{LD} é menor Z_{LN} a queda de V_R será dominante em relação ao aumento da corrente I e o efeito será a redução de P_R .

Do raciocínio anterior observa-se a importante relação entre a impedância da carga e a potência transferida ao sistema. A condição crítica de operação corresponde à potência máxima transferida ($Z_{LN}/Z_{LD} = 1$) e que a partir deste ponto se Z_{LD} continuar a diminuir sua potência ativa será reduzida. A tensão V_R passa a ser determinada pelas características da linha de transmissão e da carga que ela atende. Caso o barramento tenha um transformador com comutação automática sob carga (*Underload Tap-Changing* – ULTC) o mesmo poderá operar elevando o valor de tensão da carga. Esta operação visa reduzir o valor de Z_{LD} visto pelo sistema que por consequência reduz ainda mais V_R desencadeando uma redução progressiva da tensão, provocando assim a instabilidade de tensão. Nos estudos de estabilidade de tensão a relação P_R e V_R é de alta relevância. A Figura 16 exprime essa relação para o sistema apresentado considerando um fator de potência (FP) igual a 0,95.

Figura 16 – Curva característica Potência x Tensão (PV)

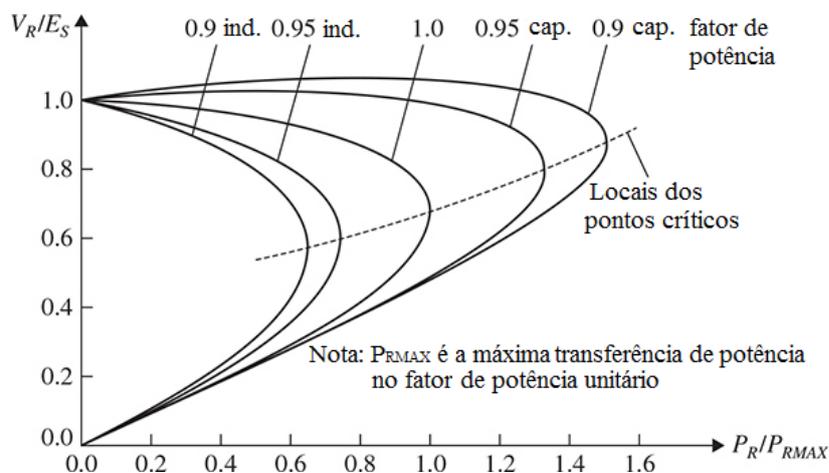


Fonte – *Power System Stability and Control*, Segunda Edição [7]. Traduzido pelo autor

Na Figura 16 há uma característica importante a ser observada. O ponto destacado como tensão crítica é onde existe apenas uma resposta para um valor de potência. Neste ponto a matriz Jacobiana do fluxo de carga apresenta uma singularidade numérica, isto é, a matriz tem determinante nulo identificado por um autovalor nulo. A parte inferior da curva a partir deste ponto é uma resposta de baixa tensão e alta corrente resultando em operação instável e por este motivo deve ser evitada.

Um componente considerável que altera a curva apresentada na Figura 16 é o fator de potência. Mudanças no FP resultarão em modificações importantes no formato da curva PV conforme pode ser constatado na Figura 17.

Figura 17 – Características da curva PV em diferentes fatores de potência



Fonte – *Power System Stability and Control*, Segunda Edição [7]. Traduzido pelo autor

Certamente o maior ganho obtido ao se realizar o controle do reativo no sistema é a ampliação do carregamento da linha. Por exemplo, no caso ilustrado na Figura 17, há um ganho de 1 para 1,3 na potência quando o fator de potência deixa de 1,0 para ser 0,95 adiantado (capacitivo). Com a modificação deste parâmetro do sistema o ganho de transferência de potência foi de 30 %. Um ganho maior ainda pode ser percebido ao posicionar o FP em 0,9 capacitivo. Essas modificações visam aumentar a estabilidade do sistema, pois distanciam o ponto de operação do ponto crítico de estabilidade. Por esta razão percebe-se o aumento do emprego dos dispositivos de compensação de reativo conforme visto na contextualização do Sistema Interligado Nacional.

2.3 TÉCNICAS DE CONTROLE

As subseções anteriores foram uma introdução geral dos problemas de estabilidade do sistema elétrico com breves conceituações sobre as instabilidades mais comuns. Pôde-se observar que em ambos os casos apresentados percebeu-se que o comportamento de estabilidade é não linear. Seja pelas características do próprio sistema elétrico de potência ou na pela natureza dos distúrbios. Tanto a estabilidade transiente, manutenção do sincronismo, quanto a estabilidade de tensão possuem características não lineares e não triviais. Esta particularidade leva ao desenvolvimento de técnicas para que operações seguras sejam realizadas no sistema com o intuito de manter sua estabilidade.

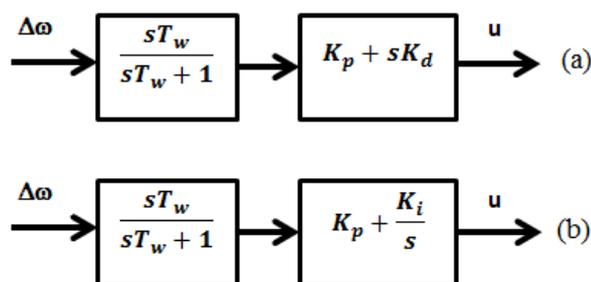
Nos SEP modernos alguns controles de amortecimento (*damping*) começam a ser introduzidos para o aperfeiçoamento da estabilidade do sistema, para isto os Estabilizadores do Sistema de Potência (*Power System Stabilizers - PSS*) passam a ser empregados. Métodos de controles mais práticos estão relacionados às respostas em frequência que retornam respostas aos estabilizadores de excitação.

Diferentes tipos de controles são empregados para auxiliar na estabilidade do SEP. Dentre estes controles citam-se os modelos realimentados tradicionais que são: Proporcional e Derivativo (PD); Proporcional Integral (PI); Proporcional Integral Derivativo (PID); e o Avanço-Atraso (*lead-lag*). Cada um dos controles anteriormente citados apresenta vantagens e desvantagens quanto à sua operação e já foram

previamente testados, em diferentes configurações, como apresentado em alguns trabalhos como [8], [9] e [10].

Controles desenvolvidos na arquitetura PD produzem uma saída de dois termos, uma saída proporcional ao sinal de entrada e outra proporcional à derivada do sinal de entrada. Controles PD aperfeiçoam o amortecimento reduzindo especialmente os picos que ocorrem no início de um distúrbio, seu diagrama de blocos básicos está presente na Figura 18 (a). De modo similar o controle PI também consiste em uma saída de dois termos uma proporcional ao sinal de entrada e outra proporcional à integral do sinal de entrada. Esta operação resulta no aprimoramento da estabilidade e melhora a recuperação da estabilidade [8]. O diagrama do controle PI está ilustrado na Figura 18 (b).

Figura 18 – Estruturas dos controles estabilizadores (a) PD e (b) PI



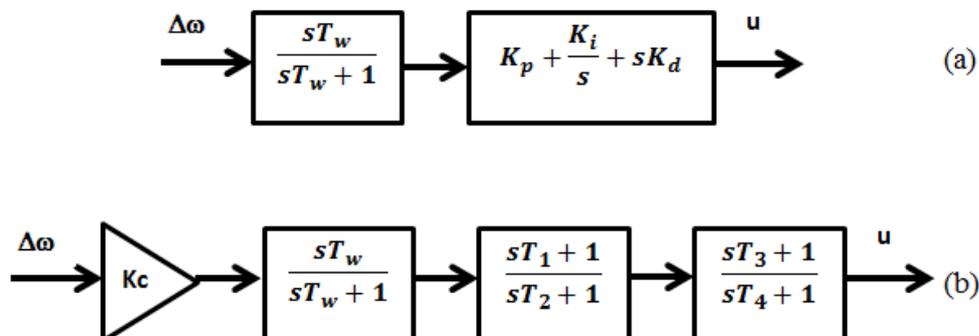
Fonte – Autor, 2022

Realizando a união dos conceitos empregados nos controles PD e PI, há o surgimento do controlador PID. Os controles PID aperfeiçoam o ganho, reduzem o erro da estabilização do sinal além de diminuir o *overshoot* do sinal, sua representação pode ser vista na figura Figura 19 (a).

O compensador *lead-lag* é a combinação dos compensadores de adiantamento e atraso. Compensadores de adiantamento aceleram a resposta a um distúrbio aumentando a estabilidade. Enquanto os compensadores de atraso melhoram a precisão do sinal no estado estável, em detrimento da redução do tempo da resposta. Se houver necessidade de melhorias do sinal tanto no momento transiente quanto no de operação estável, é desejável a utilização dos dois compensadores. Entretanto é melhor unir os dois compensadores e criar um único bloco do que colocar os dois compensadores de forma separada. Neste modelo proposto o compensador *lead-lag* combina as vantagens dos

dois compensadores [11]. Seu diagrama de blocos resumido pode ser visto na Figura 19 (b).

Figura 19 - Estruturas dos controles estabilizadores (a) PID e (b) *Lead-Lag*



Fonte – Autor, 2022

Métodos para analisar e determinar a estabilidade de um sistema já foram propostos na literatura de controle. Dentre eles o Método do Lugar das Raízes, a técnica gráfica com os critérios de estabilidade de Nyquist, o diagrama de Bode entre outros [11]. Com o desenvolvimento e a popularização da computação, novos modelos começam a ser empregados com o auxílio computacional para obter os parâmetros ótimos de um sistema. Por exemplo, em um controle PID (ou mesmo *lead-lag*) são necessários ajustes para definir os melhores parâmetros “K” e “T” de modo que o controle ofereça respostas adequadas à frente de um distúrbio. Procedimentos como o de Ziegler-Nichols podem ajudar na determinação de tais parâmetros com certa facilidade mediante simulações realizadas na planta. A maior vantagem deste método (e de outros que seguem abordagem semelhante) é que não se faz necessário o conhecimento exato do modelo matemático de toda a planta a ser controlada (o que acontece nos SEP) e assim a abordagem computacional realizando simulações pode trazer bons valores de controle [11].

No próximo capítulo será apresentada a modelagem matemática empregada nos dispositivos TCSC, assim como técnicas, propostas por diferentes autores, para realizar os ajustes no controle destes dispositivos. O modelo matemático do TCSC e o emprego do controle serão testados e validados no modelo de máquina única e barramento infinito (*Single Machine Infinite Bus – SMIB*) com simulações realizadas no ambiente Matlab/Simulink.

3 Estudo de Caso

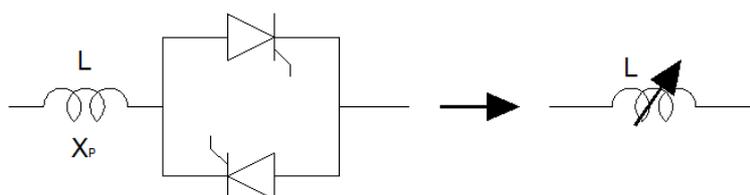
Nas seções anteriores houve uma contextualização dos sistemas de potência, dos dispositivos FACTS, uma breve revisão dos conceitos de estabilidade e de das formas de controle. Nesta seção serão apresentados os fundamentos matemáticos da operação de um TCSC para que seu princípio de funcionamento seja exposto. Outra parte a ser esclarecida é a modelagem matemática do sistema SMIB onde o controle será colocado. Com as duas conceituações apresentadas, o dispositivo TCSC então poderá ser posicionado no circuito SMIB e a partir deste ponto, com o modelo equacionado, será possível aplicar as técnicas de controle no disparo dos tiristores presentes no TCSC.

3.1 THYRISTOR CONTROLLED SERIES COMPENSATOR (TCSC)

Certamente um dos principais e mais conhecidos dispositivos FACTS são os compensadores série controlados por tiristores. As duas arquiteturas de dispositivos TCSC estão ilustrados na Figura 7 e nesta figura vê-se os compensadores série tipo indutor (a) e capacitor (b) respectivamente.

Nesta dissertação o dispositivo de compensação série tipo capacitor será o escolhido, para que melhorias no fluxo de potência e na estabilidade do sinal sejam alcançadas. Como visto na Figura 7, em paralelo ao capacitor há um reator controlado por tiristor (*Thyristor Controlled Reactor* – TCR). O controle do reator é realizado de acordo com o ângulo de disparo dos tiristores, seu circuito simplificado pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Circuito equivalente do TCR



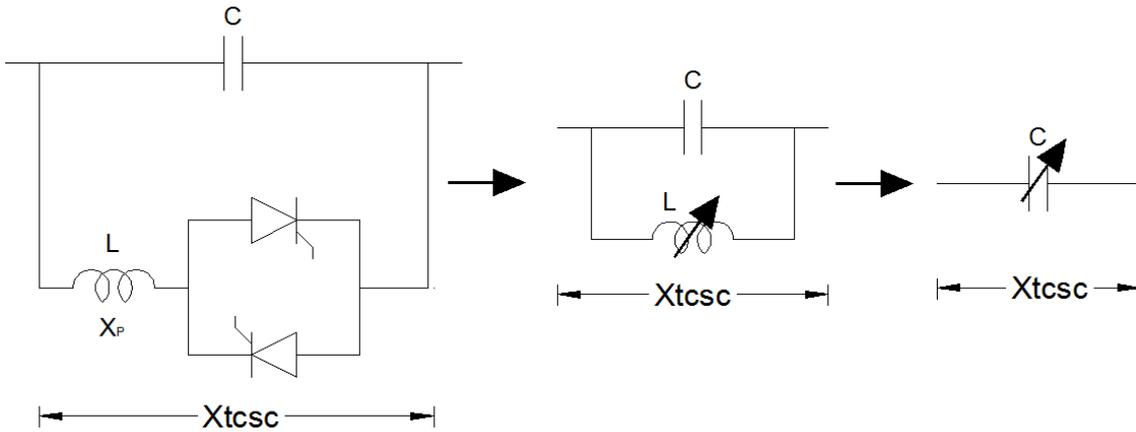
Fonte – Meikandasivam S. [12]

O TCR apresenta uma reatância indutiva X_P variável, que é controlada de acordo com o ângulo de disparo α . Portanto X_P passa a ser uma função do ângulo α conforme mostrado na equação (2) [12].

$$X_P(\alpha) = X_p \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \text{sen}(2\alpha)} \quad (2)$$

Da equação (2) o intervalo α de 0° a 90° X_P começa do valor atual de X_P até à indefinição. Este reator controlado é conectado em paralelo ao capacitor série do barramento assim sendo possível alteração na reatância capacitiva modificando a impedância da linha conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Simplificação do circuito equivalente de um TCSC



Fonte – Meikandasivam S. [12]. Redesenhado pelo autor

Do circuito principal do TCSC apresentado na Figura 21. O equacionamento da reatância X_{TCSC} será dado por [13] [14]:

$$X_{TCSC}(\alpha) = X_C - \frac{X_C^2}{(X_C - X_P)} \frac{\sigma + \text{sen}(\sigma)}{\pi} + \frac{4X_C^2}{(X_C - X_P)} \frac{\cos^2(\sigma/2) (k \tan(k\sigma/2) - \tan(\sigma/2))}{(k^2 - 1) \pi} \quad (3)$$

Legenda:

X_C é a reatância capacitiva nominal do capacitor série C;

X_P é a reatância indutiva nominal do indutor L paralelo ao capacitor C;

$\sigma = 2(\pi - \alpha)$ é o ângulo de condução do controlador do TCSC; e

$k = \sqrt{\frac{X_C}{X_P}}$ é a razão de compensação.

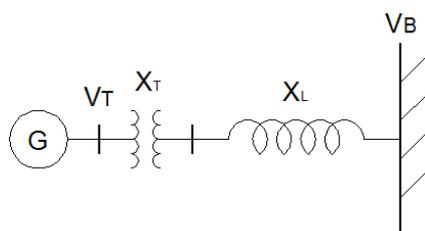
Como observado na equação (3) a reatância do TCSC está em função do ângulo de disparo do tiristor que irá alterar o valor da reatância indutiva influenciando diretamente na razão de compensação do sistema.

Durante a operação do TCSC deve-se atentar para evitar que $X_P(\alpha)$ seja igual (ou muito próximo) ao valor de X_C , pois nesta condição o sistema se tornará ressonante resultando numa impedância infinita na barra, o que seria uma condição de operação indesejável.

3.2 SISTEMA *SINGLE MACHINE INFINITE BUS* (SMIB)

Um sistema de barramento infinito e máquina única (SMIB) em resumo é uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito por meio de um transformador elevador, conforme ilustrado na Figura 22. Na figura tem-se que X_T e X_L representam as reatâncias do transformador e da linha de transmissão. V_T e V_B são as tensões terminal do gerador e do barramento infinito respectivamente.

Figura 22 – Sistema Máquina Única e Barramento Infinito (SMIB)

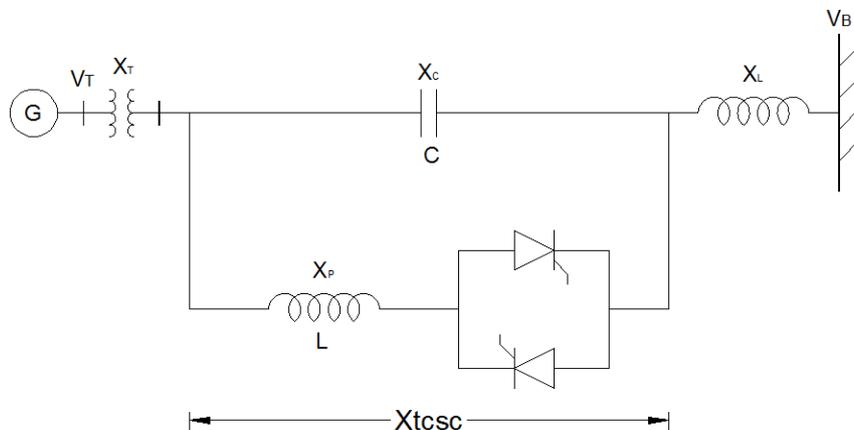


Fonte – Autor

O sentido de deslocamento da corrente e conseqüentemente da potência ocorre do gerador, através do transformado e da linha de transmissão até o barramento infinito V_B . Esta representação do sistema SMIB é empregada quando se tem interesse na simplificação de todo um sistema elétrico. Por exemplo, quando se deseja ajustar os parâmetros de um gerador, um sistema SMIB com impedância equivalente de todo o sistema pode ser proposto no lugar de se colocar todas as barras e cargas do sistema

num determinado momento. Ao circuito proposto na Figura 22 irá se somar o TCSC, em série, à linha de transmissão. O resultado está presente na Figura 23.

Figura 23 – SMIB com TCSC



Fonte – Autor

Cabe ao circuito apresentado na Figura 23 as seguintes equações não lineares conforme Kundur [7] e Panda [13]:

$$\dot{\delta} = \omega_b \Delta\omega$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} (P_m - P_e)$$

$$\dot{E}_q' = \frac{1}{T_{d0}'} (-E_q + E_{fd})$$

$$\dot{E}_{fd}' = \frac{K_A}{1 + sT_A} (V_R - V_T)$$

Onde:

$$P_e = \frac{E_q' V_B}{X_{d\Sigma'}} \text{sen}(\delta) - \frac{V_B^2 (X_q - X_d')}{2X_{d\Sigma'} X_{q\Sigma'}} \text{sen}(2\delta)$$

$$E_q = \frac{X_{d\Sigma'} E_q'}{X_{d\Sigma}'} - \frac{(X_d - X_d')}{X_{d\Sigma}'} V_B \text{cos}(\delta)$$

$$V_{Td} = \frac{X_q V_B}{X_{q\Sigma}'} \text{sen}(\delta)$$

$$V_{Tq} = \frac{X_{Eff} E_q'}{X_{d\Sigma'}} + \frac{V_B X_d'}{X_{d\Sigma'}} \cos(\delta)$$

$$V_T = \sqrt{V_{Td}^2 + V_{Tq}^2}$$

$$X_{Eff} = X_T + X_L - X_{CF} - X_{TCSC}(\alpha)$$

$$X_{d\Sigma} = X_d + X_{Eff}$$

$$X_{d\Sigma'} = X_d' + X_{Eff}$$

$$X_{q\Sigma} = X_q + X_{Eff}$$

(4)

Legenda:

δ deslocamento angular do rotor em relação à referência;

ω_b velocidade angular síncrona do campo magnético girante;

ω velocidade angular do campo magnético girante;

M constante de inércia da máquina;

P_m potência mecânica no eixo do gerador;

P_e potência elétrica fornecida;

E_q' tensão transitória de eixo em quadratura;

T_{d0}' constante de tempo transitória de eixo direto;

E_q tensão síncrona de eixo em quadratura;

E_{fd} tensão proporcional à tensão de campo;

E_{fd}' tensão transitória de campo eixo d;

K_A ganho do sistema de excitação IEEE ST1A;

T_A constante de tempo do sistema de excitação IEEE ST1A;

V_R tensão de referência do sistema de excitação IEEE ST1A;

V_T tensão terminal da máquina;

V_B tensão do barramento infinito (referência);

- $X_{d\Sigma}$ somatório das reatâncias síncronas de eixo direto;
- $X_{d\Sigma'}$ somatório das reatâncias transitórias de eixo direto;
- $X_{q\Sigma}$ somatório das reatâncias transitórias de eixo de quadratura;
- X_q reatância síncrona de eixo de quadratura;
- X_d reatância síncrona de eixo direto;
- X_d' reatância transitória de eixo direto;
- V_{Td} tensão terminal do gerador eixo d;
- V_{Tq} tensão terminal do gerador eixo q;
- X_{Eff} reatância equivalente;
- X_T reatância de dispersão do transformador;
- X_C reatância do capacitor; e
- X_{TCSC} reatância do dispositivo TCSC.

No equacionamento de um estabilizador eletromecânico normalmente utiliza-se um modelo linear que aplica incrementos nos parâmetros nas proximidades do ponto de operação. O modelo Phillips-Heffron para um sistema de potência com dispositivo FACTS pode ser obtido pela linearização do conjunto de equações apresentadas em (4) em torno de uma condição de operação do sistema de potência. As equações linearizadas são as seguintes [13]:

$$\begin{aligned}\dot{\Delta\delta} &= \omega_b \Delta\omega \\ \Delta\dot{\omega} &= \frac{(-K_1\Delta\delta - K_2\Delta E'_q - K_p\Delta\sigma - D\Delta\omega)}{M} \\ \Delta\dot{E}'_q &= \frac{(-K_3\Delta E'_q - K_4\Delta\delta - K_q\Delta\sigma + \Delta E_{fd})}{T_{d0}'} \\ \Delta\dot{E}_{fd}' &= \frac{[-K_A(K_5\Delta\delta + K_6\Delta E'_q + K_v\Delta\sigma) - \Delta E_{fd}]}{T_A}\end{aligned}$$

Onde:

$$K_1 = \frac{\partial P_e}{\partial \delta}, K_2 = \frac{\partial P_e}{\partial E_q'} \text{ e } K_p = \frac{\partial P_e}{\partial \sigma}$$

$$K_3 = \frac{\partial E_q}{\partial E_q'}, K_4 = \frac{\partial E_q}{\partial \delta} \text{ e } K_q = \frac{\partial E_q}{\partial \sigma}$$

$$K_5 = \frac{\partial V_T}{\partial \delta}, K_6 = \frac{\partial V_T}{\partial E_q'} \text{ e } K_v = \frac{\partial V_T}{\partial \sigma}$$

(5)

Legenda:

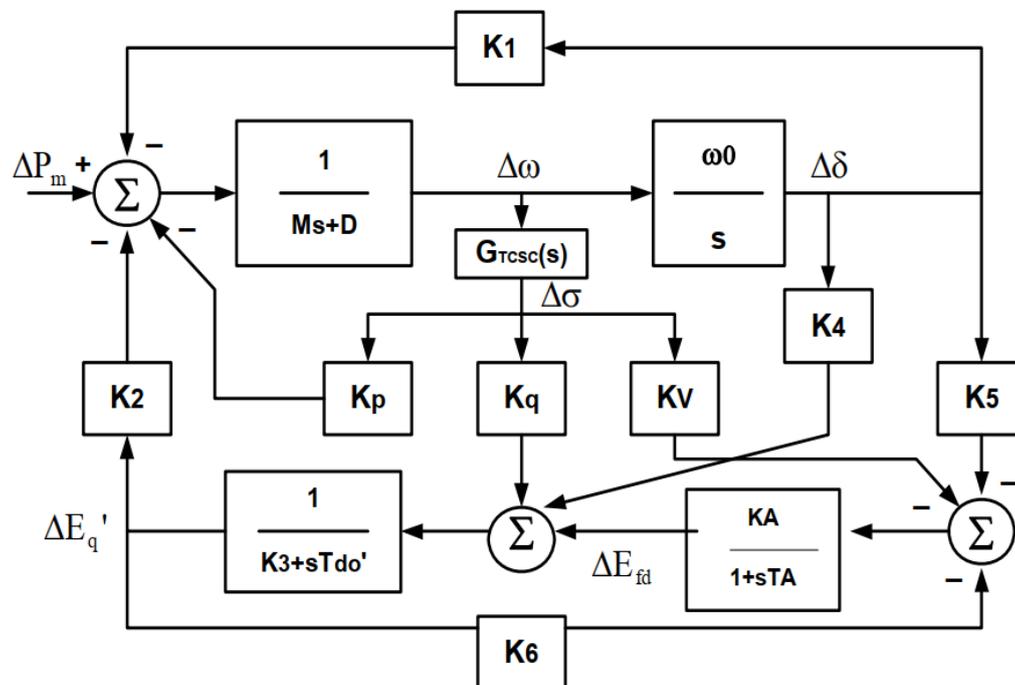
Δ variação da grandeza mencionada;

D coeficiente de amortecimento mecânico; e

Demais variáveis referenciar-se pela legenda do equacionamento (4)

O conjunto de equações em (5) representam o modelo de equações linearizadas Phillips-Heffron para um SMIB com o sistema TCSC. O diagrama de blocos para tal modelo está representado na Figura 24.

Figura 24 – Modelo Phillips-Heffron para um SMIB com TCSC



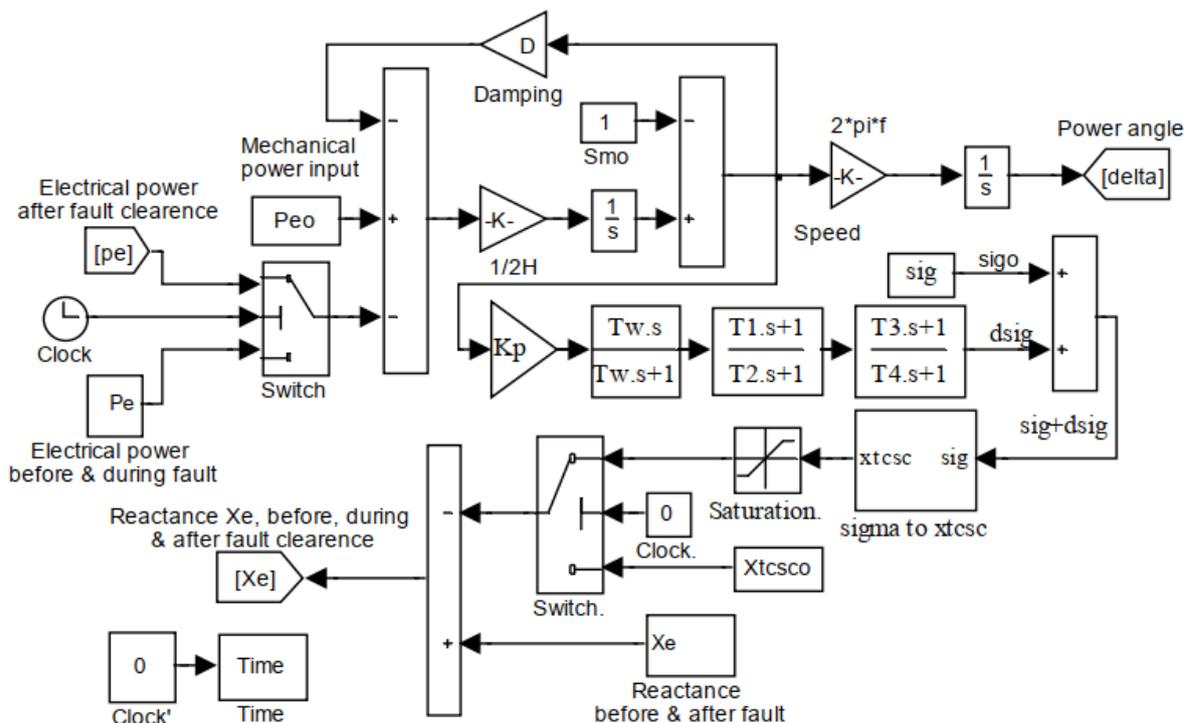
Fonte – Sidhartha Panda [13]

Com o equacionamento e a linearização do modelo SMIB/TCSC realizada o próximo passo é definir a estrutura de controle do TCSC e o emprego destas modelagens no ambiente Matlab/Simulink.

3.3 MODELO SMIB COM TCSC NO AMBIENTE MATLAB/SIMULINK

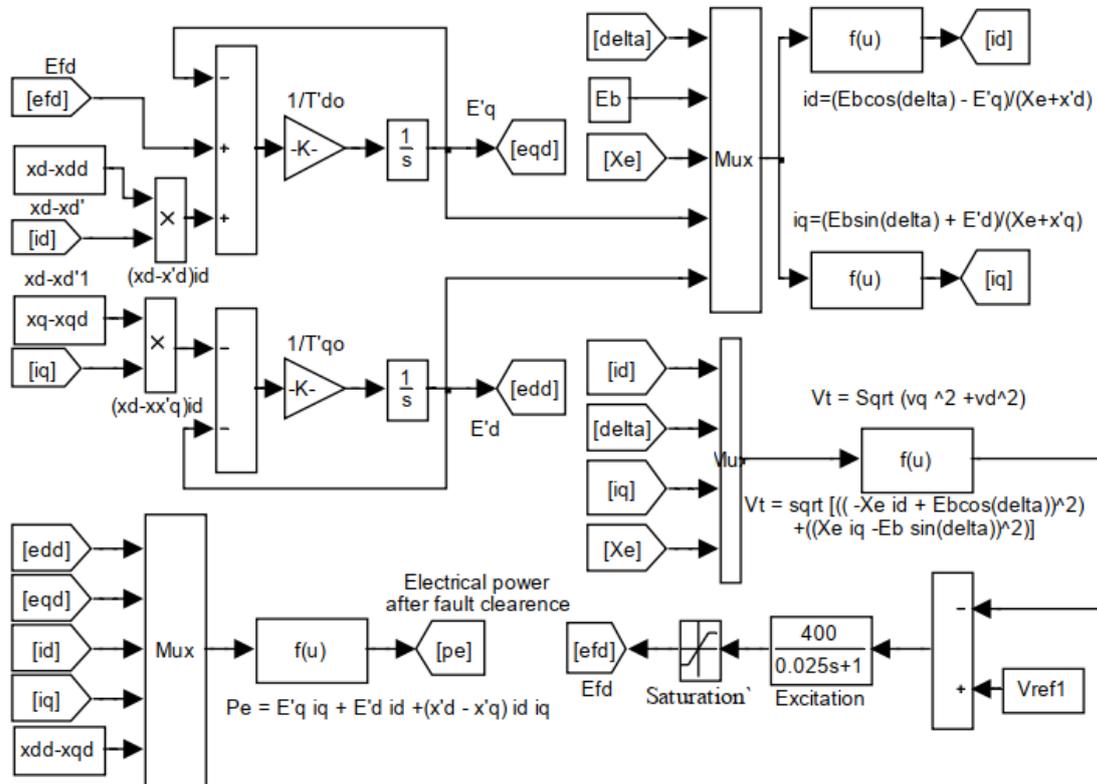
Com o entendimento do funcionamento, das equações do dispositivo TCSC, da modelagem do sistema SMIB e a união dos dois conceitos com o intuito de aprimorar o fluxo de potência e a estabilidade do sistema um modelo será apresentado. A modelagem do SEP na forma SMIB com TCSC seguirá o modelo proposto por Sidhartha Panda e Narayana Prasad Padhy [15] que está apresentado na Figura 25 e Figura 26. Esta modelagem apresenta vantagens como a simplificação do sistema facilitando sua implantação em ambientes de simulação, como o caso do Matlab/Simulink. Outra particularidade que contribuiu com o sua escolha foi que este modelo foi o empregado nos artigos de Panda [13], [15] e [16] assim, uma comparação entre técnicas será mais íntegra.

Figura 25 – Modelo Simulink do sistema SMIB com TCSC



Fonte – Sidhartha Panda e Narayana Prasad Padhy [15]

Figura 26 – Modelo Simulink para o cálculo dos parâmetros i_d , i_q , E'_d , E'_q e P_e

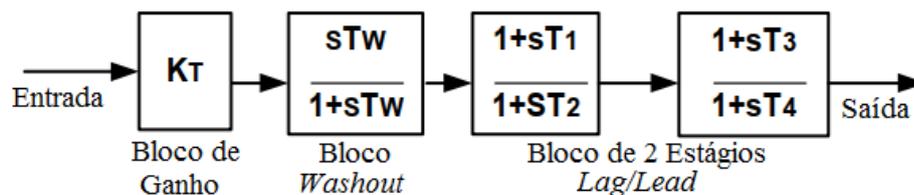


Fonte – Sidhartha Panda e Narayana Prasad Padhy [15]

Ao observar a Figura 25 vê-se que o autor optou por empregar o modelo de controle *lead-lag*. Após a leitura e revisão de artigos relacionados ao controle de dispositivos FACTS [13], [15], [17], [18] observou-se que comumente a estrutura de controle baseada no sistema *lead-lag* (como apresentado nas Técnicas de Controle e ilustrado na Figura 19 – b) é a empregada sendo no TCSC ou noutros dispositivos FACTS.

Uma estrutura de controle do tipo *lead-lag* é constituída de bloco de ganho K_T , um bloco filtro tipo *washout* e um bloco de dois estágios de compensação de fase conforme visto na Figura 27.

Figura 27 – Estrutura de controle tipo lag/lead para o TCSC



Fonte – Sidhartha [13]. Traduzido pelo autor

O bloco *washout* é empregado como um filtro passa-alta onde a constante de tempo T_w é alta o suficiente para somente permitir a passagem dos sinais relacionados às oscilações do sinal de entrada. O bloco de compensação provê um estágio de adianto de fase para balancear o estágio de atraso fechando assim as etapas entre a entrada e a saída.

Para que a estrutura de controle *lead-lag* seja empregada em um sistema, é necessário que os parâmetros K_T , T_w , T_1 , T_2 , T_3 e T_4 sejam definidos. A determinação destes parâmetros é considerada um problema de aprimoramento no espaço multimodal, onde algumas combinações destes parâmetros podem trazer resultados aceitáveis e uma única solução é a ótima. Testar individualmente cada uma dessas combinações até encontrar a resposta ótima é computacionalmente inexecutável, assemelhando-se ao Problema do Caixeiro Viajante, onde um entregador precisa definir a melhor rota para percorrer diferentes cidades visitando cada uma apenas uma vez. Uma característica que dificulta a parametrização destas variáveis no SEP é a mutabilidade do sistema de potência durante sua operação estável ou mesmo mediante a um distúrbio.

Pesquisas são realizadas nesta área para buscar os melhores parâmetros de controle por meio de métodos computacionais. Dentre alguns se podem citar métodos metaheurísticos como o *Biogeography Based Optimization* (BBO), *Firefly Algorithm*, *Multi-Objective Genetic Algorithm* (MOGA), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Whale Optimization Algorithm* (WOA) entre outros.

Nesta dissertação foram escolhidos dois métodos metaheurísticos o MOGA e o PSO, pois são os algoritmos mais empregados nas técnicas de controle dos dispositivos FACTS e como será visto adiante apresentando os resultados alcançados.

3.4 TÉCNICA DO ALGORITMO GENÉTICO MULTI OBJETIVOS (MOGA)

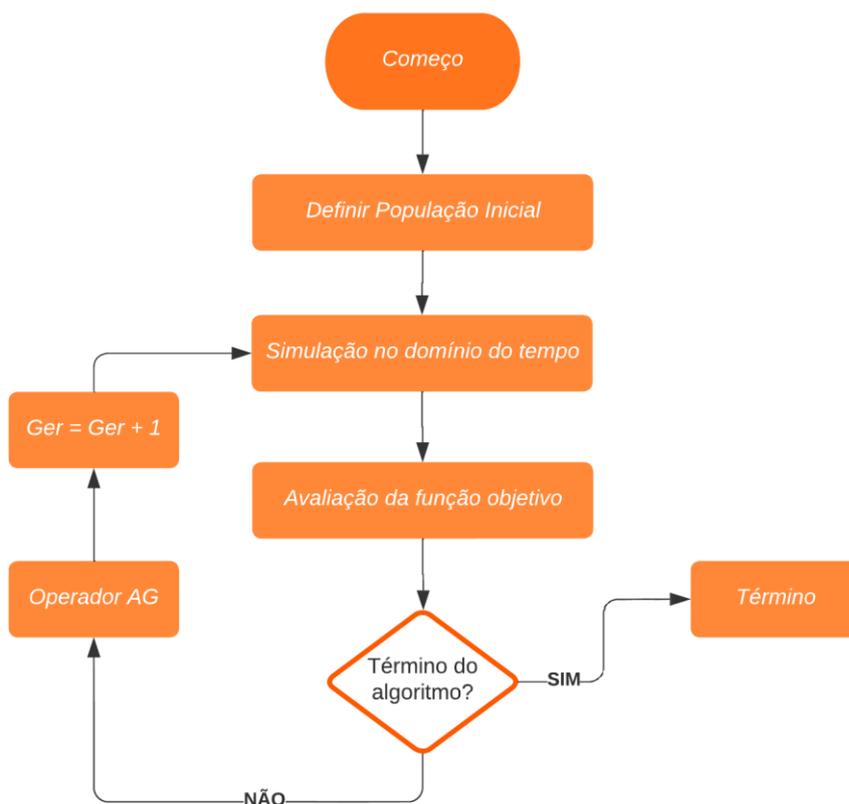
Como explicitado na seção anterior encontrar o resultado ótimo de um determinado sistema pode ser computacionalmente demorado. Problemas com esta condição são considerados intratáveis, pois não é possível testar todas as combinações possíveis e assim alcançar a resposta ótima.

Algoritmo Genético (AG) é uma técnica heurística que realiza um processo de busca aprimorado em direção dos melhores parâmetros. É importante destacar que a resposta apresentada pelo AG não será a resposta ideal, mas sim uma resposta com uma qualidade mínima aceitável. Encontrar uma resposta adequada por meio do AG depende de fatores probabilísticos e de uma técnica aleatória guiada para dar início às simulações.

Todo AG precisa atender a uma função objetivo. No caso do controle dos dispositivos TCSC o foco está em minimizar as oscilações do sistema frente a um distúrbio, aprimorando a estabilidade. Entretanto, atender a estabilidade do sistema não é uma questão de objetivo único, pois a estabilidade está relacionada a múltiplos parâmetros, dentre eles o ângulo do rotor $\Delta\delta$, a velocidade angular $\Delta\omega$ e a potência elétrica ΔP_e . Quando um AG atende mais de uma função objetivo é dito que ele é um Algoritmo Genético Multiobjetivos (MOGA). Certamente a maior dificuldade encontrada é atender aos diferentes objetivos, pois, por exemplo, ao aperfeiçoar a resposta em velocidade e ângulo, a potência pode ficar descontrolada.

A definição das variáveis K_T , T_w , T_1 , T_2 , T_3 e T_4 (apresentadas na Figura 27) terão como função objetivo o atendimento da estabilidade dos parâmetros $\Delta\delta$, $\Delta\omega$ e ΔP_e . O primeiro passo no MOGA é traduzir o problema para o computador, sendo que cada variável é um gene e o conjunto com as seis variáveis será um indivíduo ou também chamado de cromossomo. O conjunto de indivíduos é a população. Indivíduos desta população serão cruzados, sendo que os genes dos pais (geração 1) passarão aos filhos (geração 2) e estes serão analisados na função objetivo. Se a função objetivo for atendida o ciclo geracional termina, caso não seja atendida, uma nova geração é iniciada com os filhos. O fluxograma do MOGA está presente na Figura 28.

Figura 28 – Fluxograma MOGA



Fonte – Sidhartha Panda [13]. Traduzido e redesenhado pelo autor

Quando se falou que o MOGA possui uma técnica aleatória guiada quer dizer que os indivíduos da população inicial tiveram seus genes já definidos pela experiência de um operador. Este passo é muito importante para o sucesso da simulação, visto que usar parâmetros aleatórios tenderá a estender as simulações devido à existência de resultados divergentes. Outra característica importante no AG é que após o cruzamento o cromossomo filho poderá ter um de seus genes mutado pelo algoritmo, isto é necessário para que o algoritmo deixe de focar a solução em uma única direção e passe a considerar outras direções no espaço de soluções.

Sidhartha Panda [13] em seu trabalho, antes de iniciar a rotina de iterações MOGA fez as seguintes ponderações quanto à função de transferência do controle do TCSC. Sua função de transferência está apresentada na equação (6).

$$u = K_T \left(\frac{sT_W}{1 + sT_W} \right) \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right) \left(\frac{1 + sT_3}{1 + sT_4} \right) y$$

(6)

Da função mostrada em (6) \mathbf{u} e \mathbf{y} são os sinais de saída e entrada respectivamente. O valor de T_w é definido previamente como 10 segundos, e por esta razão terá o seu gene excluído do cromossomo. A variável de entrada para o sistema é a variação da velocidade $\Delta\omega$ e a saída é o ângulo de disparo do tiristor $\Delta\sigma$. Na condição de estabilidade é esperado um valor de $\Delta\sigma = 0$.

Por fim assumiu que as fases dos compensadores são similares, portanto seus limites para simulação serão iguais $T_1 = T_2 = T_3 = T_4$. Por esta razão, no algoritmo genético, deverão ser definidos o ganho K_T e as constantes de tempo T_1, T_2, T_3, T_4 . Os limites de incerteza dados às variáveis podem ser vistos na Tabela 1, este passo é importante para que as iterações sejam guiadas.

Tabela 1 – Limites das variáveis desconhecidas

Parâmetros	K_T	$T_1, T_2, T_3, T_4,$
Valor Mínimo	30	0,1
Valor Máximo	80	0,6

Fonte – Sidhartha Panda [15]

Os parâmetros da simulação foram definidos com população inicial de 50 indivíduos (cromossomos), um máximo de 100 gerações (iteraões) e um grau máximo de mutação de 0,3 entre gerações. O melhor resultado encontrado é o apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de controle do TCSC aperfeiçoados por MOGA

Ganho	Constantes de tempo			
K_T	T_1	T_2	T_3	T_4
32,6247	0,1464	0,1402	0,1235	0,1524

Fonte – Sidhartha Panda [15]

Simulações foram realizadas com as soluções presentes na Tabela 2 e o autor concluiu que a solução apresentada entrega bons resultados para os parâmetros $\Delta\delta$, $\Delta\omega$ e ΔP_e (ângulo, velocidade angular e potência). Um resultado que não fosse unânime já era esperado, devido à natureza multiobjetivos do problema de estabilidade. Nestas situações atender todos os objetivos com uma única solução por muitas vezes é não viável.

Com estes resultados optou-se em empregar a solução da Tabela 2 nas simulações a serem realizadas próximo capítulo. Na próxima seção tem-se o emprego de mais um algoritmo para estabelecer os parâmetros de controle do TCSC.

3.5 TÉCNICA *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* (PSO)

Na mesma vertente das técnicas estocásticas baseada em população, tem-se o método do Otimizador por Enxame de Partículas ou o *Particle Swarn Optimization* (PSO). A origem deste método se deu na observação dos animais que optam pelo coletivismo, aproveitando a partilha social, ao invés da individualidade, que resulta na competição. Os principais exemplos a serem citados são os peixes que se agrupam em cardumes e o agrupamento de algumas aves quando estas estão se deslocando.

Esta técnica compartilha algumas semelhanças com o Algoritmo Genético apresentado na seção anterior, como a definição de uma população inicial, que possui uma solução guiada, e após isto a atualização das gerações. Entretanto, diferente do AG o PSO não apresenta operadores de evolução como o cruzamento e mutação. Com estas modificações, tem-se um algoritmo mais simples, isto é, que usa menos parâmetros e por isso torna-se mais atrativo de se utilizar.

Soluções em potencial para o problema de melhoramento são chamadas de partículas e as mesmas “voam” pelo espaço do problema em busca da melhor resposta. O deslocamento da partícula pode ocorrer com base em duas premissas. A primeira esta relacionada com a própria experiência e a segunda é com a experiência adquirida do bando seguindo as partículas (soluções) que apresentam melhores resultados. No primeiro caso, a partícula apresenta uma memória para que ela possa voltar ao ponto anterior caso o novo ponto seja menos favorável.

No algoritmo PSO a memória da posição referente à melhor aptidão é denominada “*pbest*” enquanto a melhor de todas as partículas na população (grupo) tem o nome de “*gbest*”. A velocidade de deslocamento da partícula é variável e seu cálculo leva em consideração os parâmetros “*pbest*” e “*gbest*” conforme a equações presente em (7).

$$v_{j,g}^{(t+1)} = w \cdot v_{j,g}^{(t)} + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_{j,g} - x_{j,g}^{(t)}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest_g - x_{j,g}^{(t)}) \quad (7)$$

$$x_{j,g}^{(t+1)} = x_{j,g}^{(t)} + v_{j,g}^{(t+1)} \quad (8)$$

Legenda:

$v_{j,g}^{(t)}$ é a velocidade da partícula "j" na iteração "t"

w é o fator de inércia da velocidade

c_1 e c_2 são os fatores cognitivos e de aceleração social respectivamente

r_1 e r_2 são números aleatórios distribuídos uniformemente no intervalo 0 a 1

$pbest$ é a melhor posição da partícula "j"

$gbest$ é a melhor posição do grupo

$x_{j,g}^{(t)}$ é a posição da partícula "j" na iteração "t"

$j = 1, 2, \dots, n$ (número de partículas em um grupo)

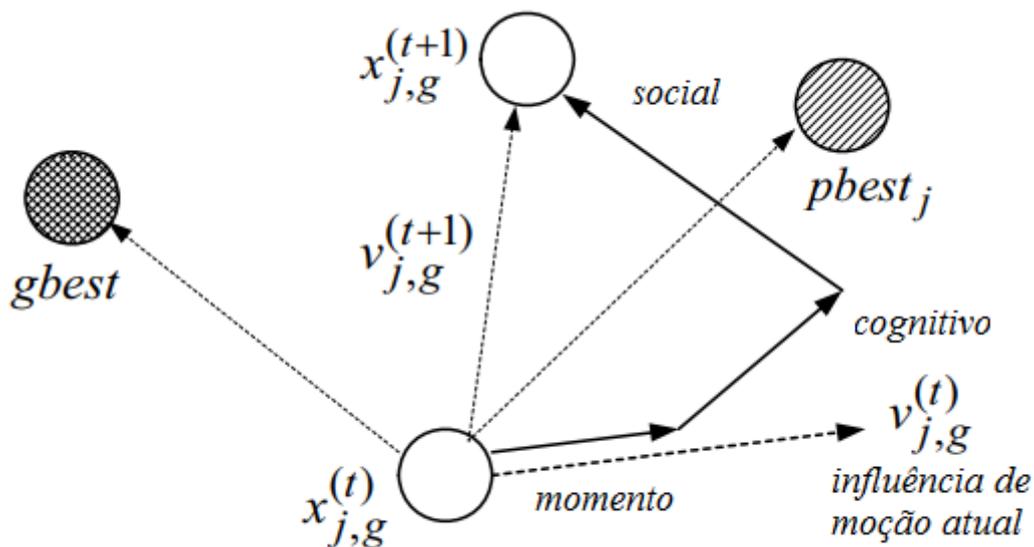
$g = 1, 2, \dots, m$ (número de membros em uma partícula)

t número de iterações

Analisando a equação da velocidade (7), observam-se as variáveis aleatórias r_1 e r_2 que dão um comportamento imprevisível de velocidade para cada partícula. Como a velocidade é variável e se encontra na equação de posição (8), a mesma também será variável e interdependente do grupo.

Cada partícula se move livremente no espaço de soluções com uma velocidade concordante com sua melhor resposta anterior e em conjunto com a melhor solução do grupo. A velocidade de atualização do PSO está dividida em três partes: momento (w), cognitivo (c_1) e social (c_2). Cada um destes parâmetros empurra a partícula para um novo caminho que também é direcionado pelas melhores em experiência. Na Figura 29 há uma representação de como este deslocamento ocorre.

Figura 29 – Visualização da velocidade e localização, atual e futura, de uma partícula no PSO

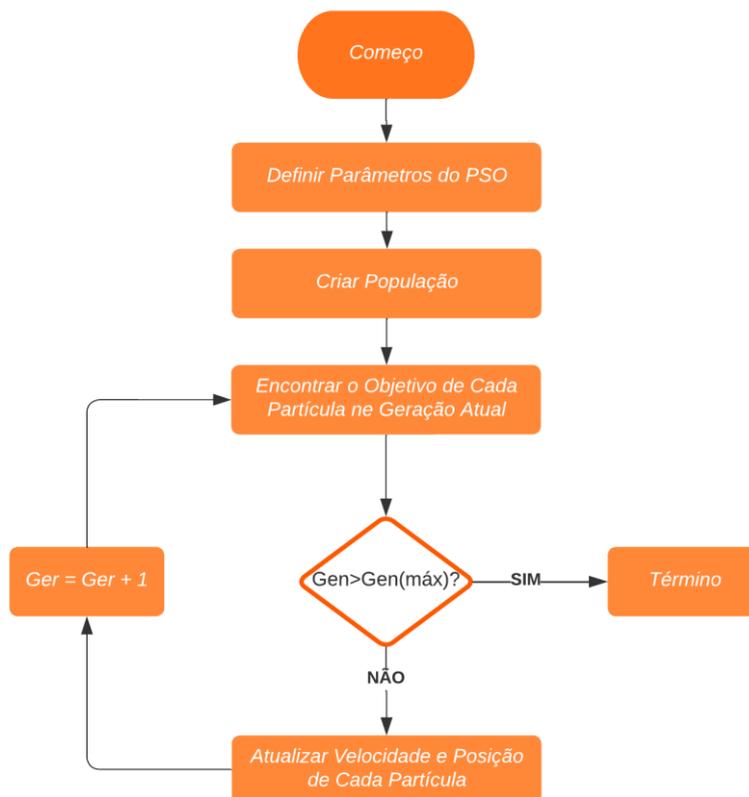


Fonte – Sidhartha Panda [16]. Traduzido pelo autor

Da mesma maneira que o algoritmo MOGA a técnica do PSO visará definir as variáveis K_T , T_1 , T_2 , T_3 e T_4 (conforme apresentadas na Figura 27), entretanto o autor neste caso optou por fazer $T_1 = T_3$ e $T_2 = T_4$ com o multi-objetivo de atender a estabilidade dos parâmetros $\Delta\delta$, $\Delta\omega$ e ΔP_e .

O primeiro passo no PSO é definir os parâmetros iniciais de simulação que irão afetar significativamente a velocidade de convergência do algoritmo. Deve-se, também, definir os limites das incertezas das variáveis para que a busca pela melhor resposta seja restrita (direcionada) a um determinado grupo de soluções. Definidos os parâmetros e os intervalos o ciclo de iterações é iniciado e seu término é dado quando o número de gerações, definido nos parâmetros iniciais, é alcançado. O fluxograma do processo PSO pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 - Fluxograma PSO



Fonte – Sidhartha Panda [16]. Traduzido e redesenhado pelo autor

Os resultados alcançados após a simulação, assim como os limites estabelecidos para cada variável, estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 – Limites de incertezas de cada variável e os parâmetros otimizados pelo PSO

Parâmetros	K_T	T_1	T_2
Valor Mínimo	5	0,1	0,1
Valor Máximo	70	1,0	1,0
Parâmetro Otimizado pelo PSO	35,2107	0,80904	0,75106

Fonte – Sidhartha Panda [16]

Ao término o autor informou que este processo de aprimoramento de parâmetros pelo PSO consumiu aproximadamente 3.207 segundos de tempo computacional. Estes valores serão considerados para as simulações na seção dos resultados. O próximo método a ser empregado será a proposta de emprego da lógica Fuzzy.

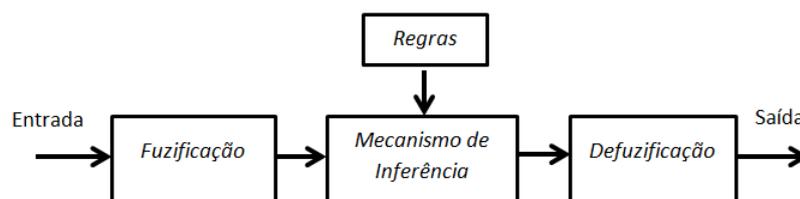
3.6 LÓGICA FUZZY

Muitos dos controles empregados nos dispositivos FACTS são do tipo PI e regulam o desvio da potência ativa e reativa. Apesar dos controles PI serem simples e fáceis de desenvolver seu desempenho fica comprometido quando oscilações de grande amplitude ocorrem no sistema. Para contornar tal problema um controle lógico Fuzzy simples pode ser utilizado. É sabido que a lógica Fuzzy já é aplicada, há muitos anos, com sucesso no controle de excitação de máquinas [19] e no controle de chaveamento de reatores [20].

Diferenciando da linha das técnicas computacional estocásticas, onde se busca uma boa solução no emaranhado de respostas, a lógica Fuzzy tem como base a observação de como o ser humano toma decisões tendo como referência informações linguísticas ao invés de numéricas. Se, por exemplo, uma pessoa com a estatura de até 1,50 (m) é baixa e a pessoa com 1,90 (m) ou mais é alta, haverá, em certo ponto, determinada indefinição quando valores entre 1,50 e 1,90 forem apresentados. Esta região não definida é considerada difusa onde respostas imprecisas podem ocorrer. Entretanto não se deve rotular a lógica Fuzzy como incerta, mas sim uma teoria que faz a modelagem dos aspectos incertos.

A “*fuzificação*” dos dados de entrada é o início do processo, isto é, as informações de entrada são convertidas em suas variáveis Fuzzy correspondentes. Estas variáveis serão analisadas pelo mecanismo de inferência, que normalmente pode ser do tipo Takagi-Sugeno ou Mamdani. A saída obtida pelo mecanismo de inferência é de natureza difusa e, por esta razão, é necessário que ocorra a “*defuzificação*” por um método definido, normalmente o método do centroide, tornando a saída aplicável ao sistema a ser controlado. O resumo destes passos pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 – Diagrama de blocos da lógica Fuzzy



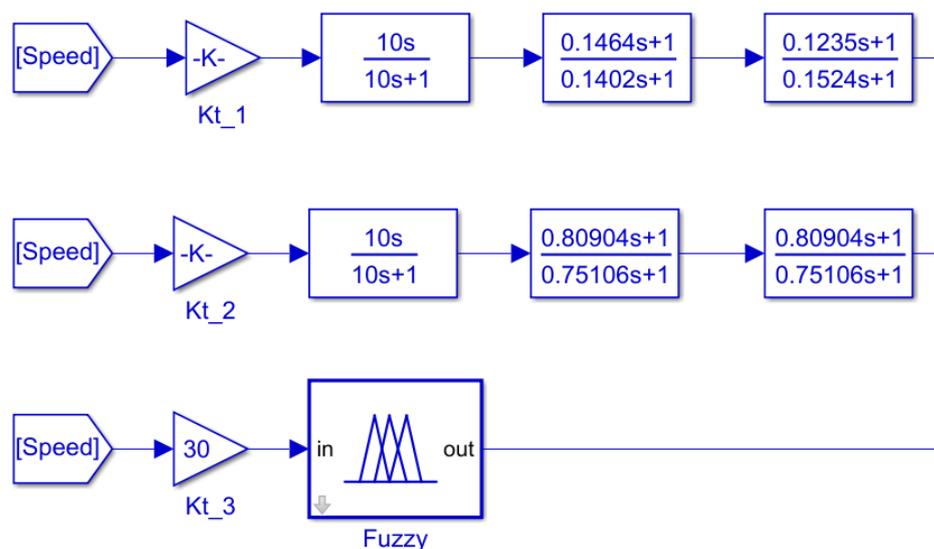
Fonte - Autor

Comparando os passos explicados anteriormente com os métodos estocásticos apresentados em 3.4 (MOGA) e 3.5 (PSO) percebe-se maior simplicidade na elaboração do modelo de controle. Não é necessário, por exemplo, definir conjunto de respostas parcialmente satisfatórias (populações) além de não ser necessário definir limites de operação para variáveis que, em alguns casos, é necessária a experiência do operador.

Por estes motivos, será proposto o emprego da lógica Fuzzy, com método de inferência linguístico (tipo Mamdani), onde a entrada do sistema será a velocidade angular (W) da máquina e a saída será a variação do ângulo ($\Delta\sigma$) do disparo dos tiristores, no lugar dos parâmetros T_1 , T_2 , T_3 e T_4 .

A proposta então é realizar a substituição da estrutura de controle do tipo *lead-lag* (presente nos métodos anteriores) por uma lógica Fuzzy com método de inferência linguística. A substituição será feita no modelo Simulink conforme ilustrado na Figura 32, que é uma das partes do esquema apresentado na Figura 25.

Figura 32 – Comparativo das estruturas de controle em ambiente Simulink. (a) *Lead-lag* MOGA (b) *Lead-lag* PSO (c) Fuzzy



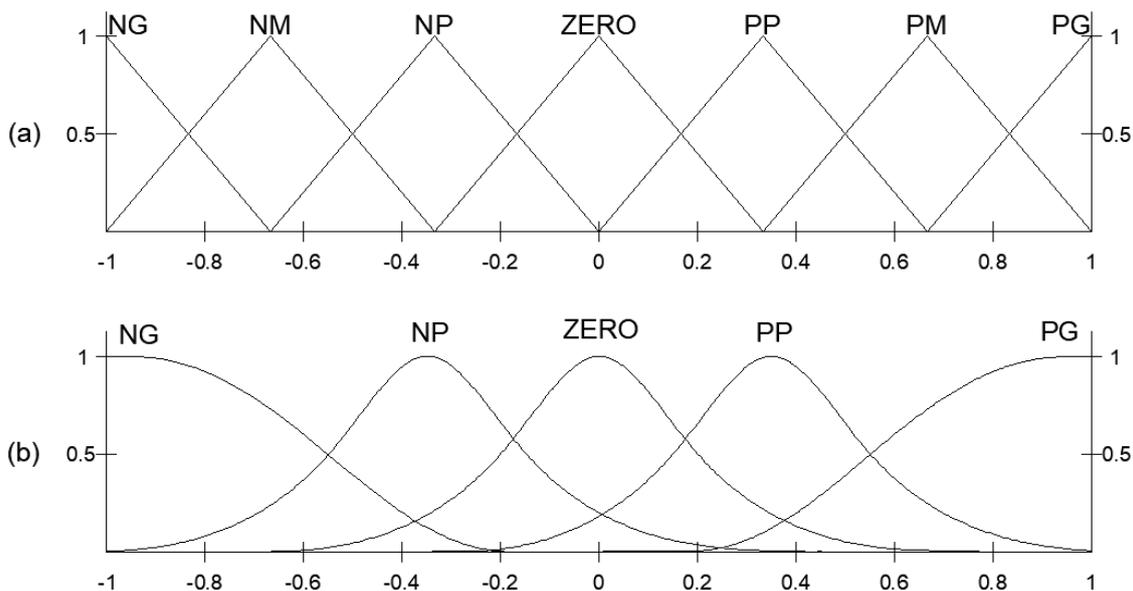
Fonte - Autor

Esta escolha foi feita, pois é esperado ganho no tempo de modelagem do problema, a possibilidade de empregar parâmetros linguísticos e especialmente a não necessidade de se realizar longas iterações para alcançar respostas aprimoradas. Entretanto, para que a lógica Fuzzy seja utilizada é necessário definir as funções membro ou *Membership Functions* (MF) e as regras que irão reger o método de inferência Mamdani.

Para a definição das MF o trabalho realizado por Hammed [21] foi tomado como referência. Em seu artigo é feita a proposta de se empregar um sistema PI-Fuzzy com regras reduzidas para o controle de um TCSC. Sua pesquisa evidencia que um sistema Fuzzy com apenas nove regras tem uma excelente resposta quando comparado ao mesmo sistema com 49 regras. Esta redução faz com que o sistema PI-Fuzzy seja empregado em codificações em tempo real sem perda de qualidade na operação. Algumas modificações serão necessárias para adequar as MF e as respectivas regras, visto que no trabalho de Hammed [21] ele empregou um sistema Fuzzy de dupla entrada “ e ” e “ Δe ” (erro e sua variação) e uma única saída “ Δu ”. Como visto no diagrama apresentado na Figura 32 há apenas uma entrada que é a velocidade angular W , e é importante a manutenção desta entrada para que o paralelo entre as técnicas de controle seja o mais fiel possível.

Hammed [22] sugere que as MF, de entrada e saída, sejam divididas em 7 subconjuntos, sendo que cada um destes subconjuntos seja representado por uma função membro triangular. Cada subconjunto triangular irá se sobrepor ao próximo em 50 % de seu domínio. O domínio das MF de entrada e saída estão normalizados entre $[-1,1]$. Na Figura 33 as MF de entrada da Velocidade (W) apresentadas em (a) e as MF ($\Delta\sigma$) de saída em (b). As funções membro de entrada foram seccionadas em sete funções triangulares igualmente espaçadas conforme detalhado anteriormente. Entretanto a saída é composta por três funções gaussianas centrais, uma função formato Z no lado negativo e uma função formato S no lado positivo conforme ilustrado na Figura 33 (b).

Figura 33 – Funções Membro de entrada e saída: (a) Velocidade Angular (W); e (b) Variação do Ângulo ($\Delta\sigma$). Onde N – Negativo, P – Positivo, G – Grande, M – Médio, P – Pequeno;



Fonte - Autor

Como o método de inferência escolhido foi o Mamdani, é necessário definir as regras de operação. Devido ao empregado de somente uma entrada e uma saída, não é possível estabelecer relação com os trabalhos apresentados em [21] e [22]. O conjunto de regras apresentado na Tabela 4 será o utilizado nas simulações.

Tabela 4 – Regras do sistema de inferência Mamdani

Velocidade (W)	Variação do Ângulo ($\Delta\sigma$)
NG	NG
NM	NG
NP	NP
ZERO	ZERO
PP	PP
PM	PG
PG	PG

Fonte - Autor

As regras propostas são, de certa forma, mais simples do que as apresentadas em [21] onde duas entradas e nove regras são utilizadas. É possível observar também a relação direta entre a entrada e a saída, onde correções de ângulo severas são aplicadas quando a velocidade está muito fora de seu estado estável.

A lógica Fuzzy proposta irá substituir as constantes de tempo T_w , T_1 , T_2 , T_3 e T_4 do modelo *lead-lag*, entretanto ainda é faltante o ganho K_T . Com base nas simulações

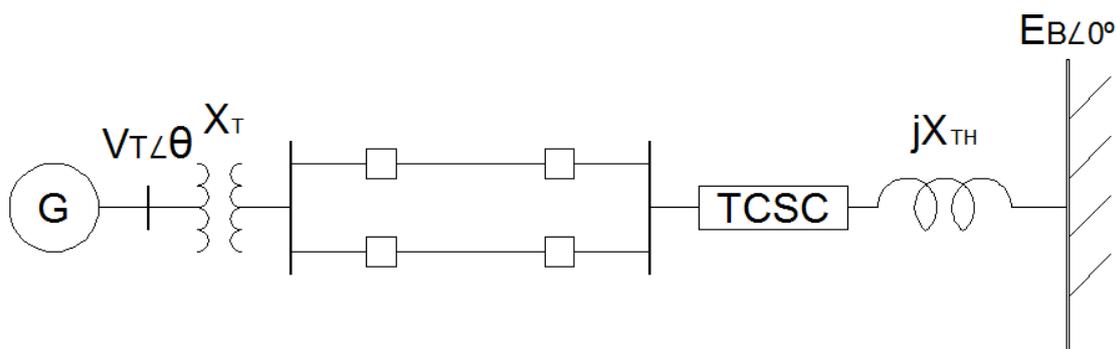
realizadas do MOGA e do PSO os autores fixaram valores para a incerteza de K_T entre 5 e 80. Com a lógica Fuzzy efetivada no diagrama de blocos do Simulink, rápidas simulações foram feitas com alguns valores inteiros de K_T iniciando em 0 até 100 com um passo entre simulações de 10. Observou-se que o sistema já se torna estável quando K_T é superior a 20, sendo assim muito inferior aos ganhos propostos por técnicas apresentadas no MOGA e PSO. Para ter respostas mais rápidas um ganho de 30 será utilizado nas simulações.

No próximo capítulo os dados das simulações realizadas pelos processos estocásticos MOGA e PSO serão comparados ao emprego da Lógica Fuzzy, em condição nominal, de sobrecarga e com os parâmetros do SMIB alterados.

4 Resultados

Os controladores propostos no capítulo anterior, nas seções 3.4, 3.5 e 3.6 foram aplicados e testados em um sistema de potência do tipo SMIB, semelhante ao apresentado na Figura 23, porem com o emprego de uma linha de transmissão em paralelo, conforme mostrado na Figura 34.

Figura 34 – SMIB com TCSC e linha de transmissão em paralelo



Fonte – Sidhartha Panda [16]

As simulações irão ocorrer em três situações de falhas diferentes. A primeira o gerador está operando com baixo carregamento mecânico e a segunda situação com o gerador operando um pouco acima de sua capacidade nominal, nestas duas situações um curto trifásico ocorrerá no barramento do gerador. O terceiro cenário ocorrerá quando o gerador está com carregamento nominal de 1 [pu] e um curto trifásico ocorrerá em uma das linhas, sendo que após o curto a linha com o defeito será retirada do sistema.

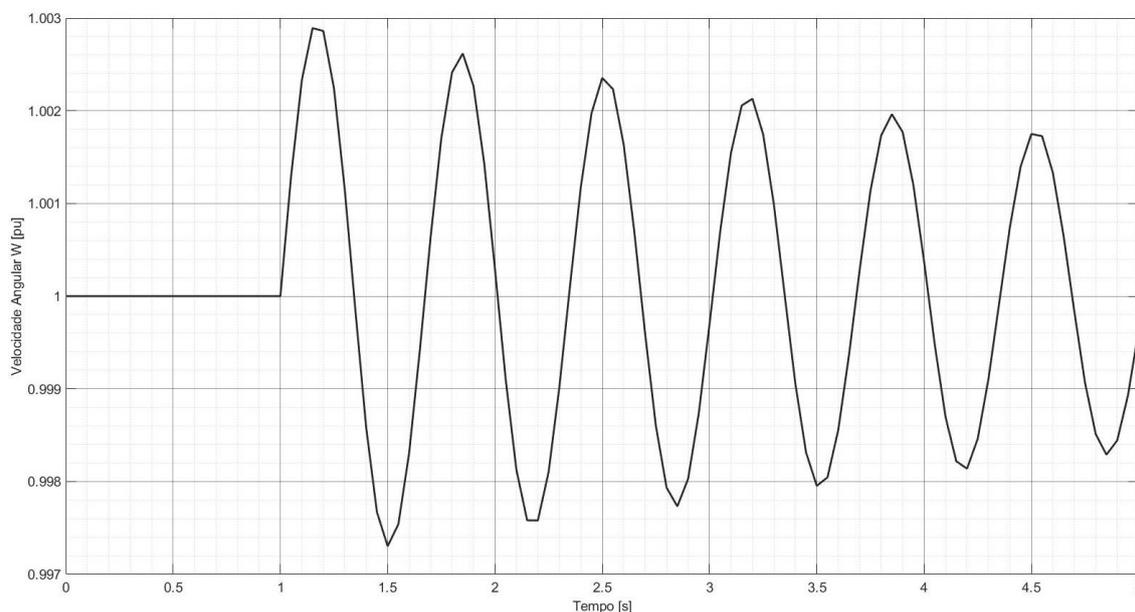
Nos três casos citados o curto-circuito será do tipo trifásico e ocorrerá no instante de 1 [s] e será extinto após 100 [ms], retornando o circuito às suas características originais nas situações 1 e 2 e na situação 3 tem-se a remoção de uma das linhas de transmissão do sistema alterando a impedância do SMIB. O programa utilizado para o cálculo dos parâmetros iniciais foi desenvolvido e executado no Matlab R2020a, o código e todos os outros parâmetros do SMIB utilizados no Matlab estão presentes no Apêndice A: Programa em Matlab. O diagrama do Simulink foi feito com base no modelo apresentado na Figura 25 e na Figura 26 referente ao trabalho publicado por [15] e seu modelo está no Apêndice B: Interface Gráfica Simulink.

As constantes de tempo e ganho empregados no Algoritmo Genético (MOGA) são os presentes na Tabela 2. Os parâmetros utilizados no *Particle Swarm* (PSO) são os mostrados na Tabela 3. E por fim a lógica Fuzzy seguirá a entrada, saída, funções membros e as regras descritas na seção 3.6 e que está presente no Apêndice C: Lógica Fuzzy Proposta.

4.1 FALTA TRIFÁSICA NO BARRAMENTO COM BAIXO CARREGAMENTO

Neste primeiro exemplo, a máquina geradora encontra-se operando com carregamento mecânico de 0,8 [pu] quando em 1 [s] ocorre uma falta trifásica no barramento da máquina com duração de 100 [ms]. Após o período do curto a falha é eliminada e o sistema retornará aos seus parâmetros nominais. Antes de empregar qualquer uma das técnicas de controle, a velocidade angular será apresentada na Figura 35 num intervalo de tempo de 5 [s].

Figura 35 – Velocidade angular, falta trifásica no barramento do gerador com carregamento de 0,8 [pu]



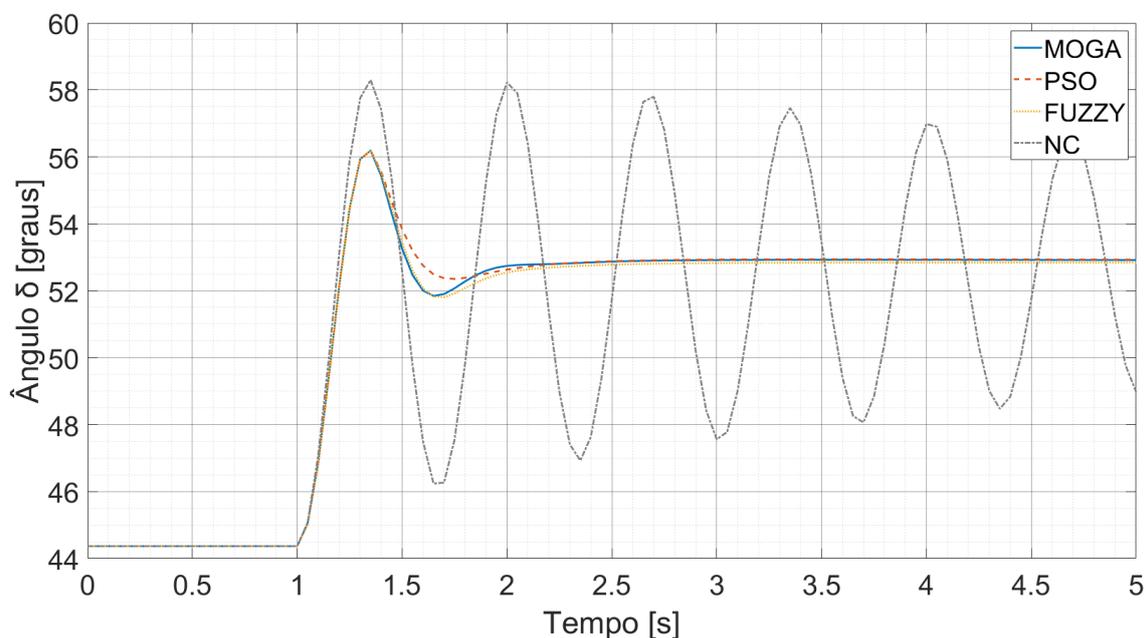
Fonte – Autor

Analisando a Figura 35 percebe-se que a velocidade se mantém nominal até o instante de 1 [s] quando a perturbação ocorre. A resposta do sistema conforme explicado em 2.2.1 corresponde ao Caso 1 da Figura 14. Isto é, uma resposta com uma leve variação na amplitude sendo que a estabilidade será alcançada naturalmente com o

passar do tempo. Nesta situação técnicas de controle podem ser desprezadas, pois não há risco de instabilidade do sistema. Entretanto o emprego do controle pode trazer benefícios no tempo de estabilização dos sinais.

A seguir serão apresentadas as respostas do TCSC com as técnicas MOGA, PSO e da lógica Fuzzy para as variáveis de deslocamento angular do rotor da máquina, potência elétrica entregue ao barramento infinito, velocidade angular do rotor e a reatância equivalente do circuito.

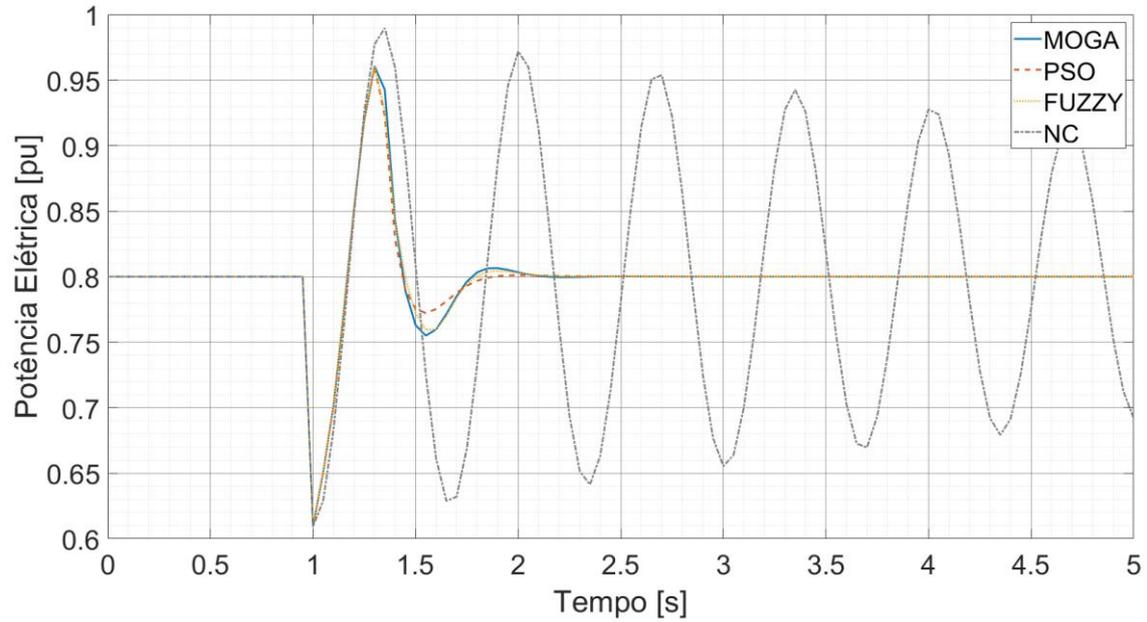
Figura 36 – Variação do ângulo δ em graus no cenário 1



Fonte – Autor

Na Figura 36 a máquina, mesmo quando não controlada, atinge a estabilidade em longo prazo. O novo ângulo de 53° encontra-se assim na região de estabilidade. As técnicas de controle reduzem as oscilações em até um segundo após a falta.

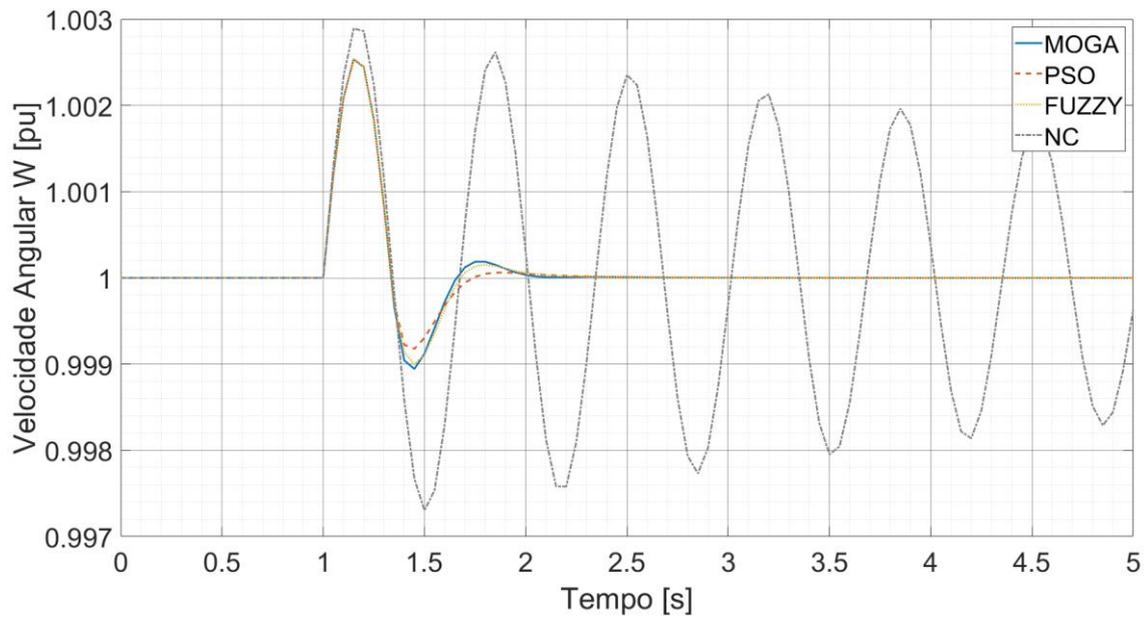
Figura 37 – Variação da potência elétrica em pu no cenário 1



Fonte – Autor

Conforme visto na Figura 37 a potência elétrica transferida ao barramento infinito tende a zero durante a falta, pois a mesma irá alimentar o curto. Por estar na região de estabilidade a máquina, em longo prazo irá se estabilizar. As três técnicas de controle atuam de maneira muito semelhante.

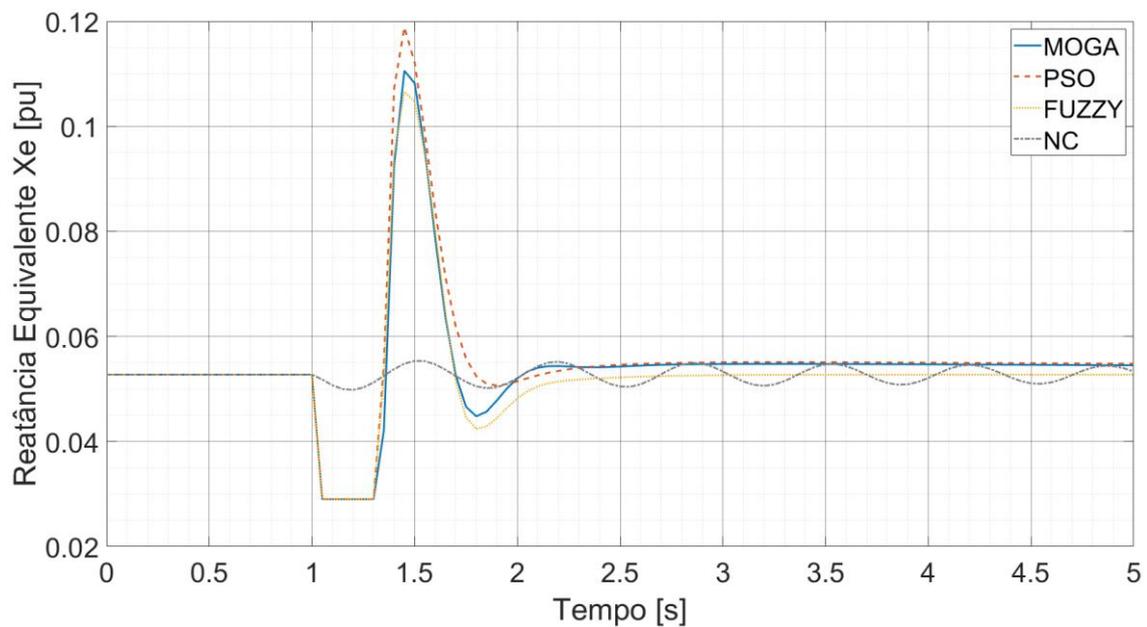
Figura 38 – Variação da velocidade angular em pu no cenário 1



Fonte – Autor

Na Figura 38 vê-se uma pequena excursão de sinal significando pouca variação na frequência da máquina.

Figura 39 - Variação da reatância equivalente em pu no cenário 1



Fonte – Autor

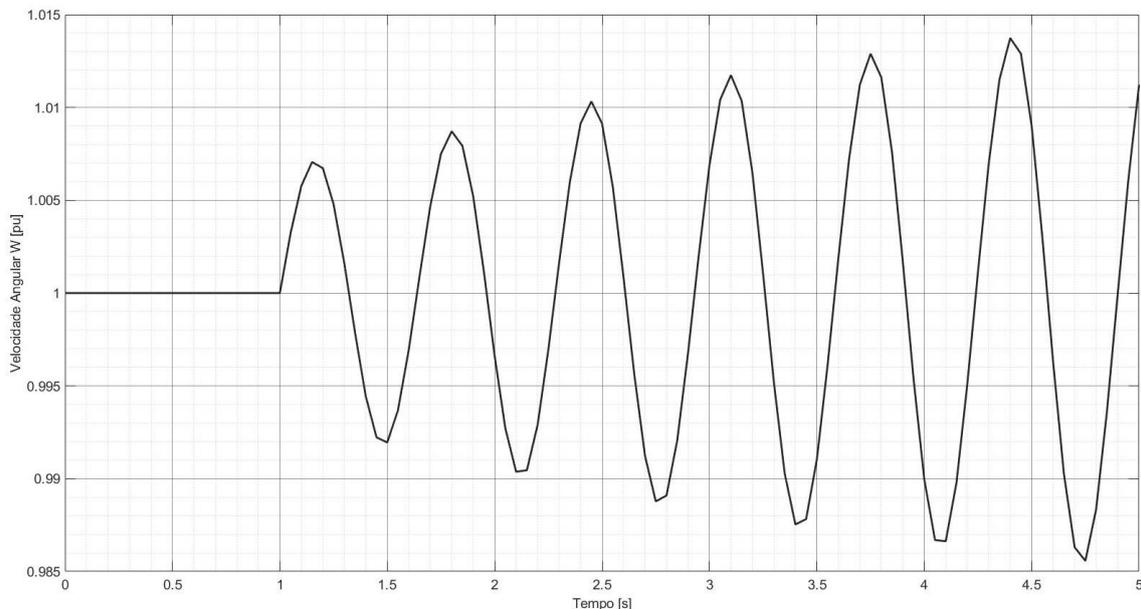
Quando controlado é possível observar, na Figura 39, o comportamento do TCSC para suprimir as oscilações. Quando não controlado, pequenas oscilações são percebidas, mas com tendência à estabilidade.

No cenário 1, onde a falta ocorre no barramento do gerador com baixo carregamento, pode-se observar que não há grande diferença nas repostas quando sem compararmos as técnicas de controle. Em todos os casos o tempo de equilíbrio do sistema se dá em até 1,0 [s] após o início da falta. Pequenos desvios podem ser observados nas repostas.

4.2 FALTA TRIFÁSICA NO BARRAMENTO COM ALTO CARREGAMENTO

A segunda situação a ser simulada, a máquina geradora encontra-se operando com carregamento mecânico de 1,1 [pu] quando em 1 [s] ocorre uma falta trifásica no barramento da máquina com duração de 100 [ms]. Após o período do curto a falha é eliminada e o sistema retornará aos seus parâmetros nominais. A velocidade angular será apresentada na Figura 40 num intervalo de tempo de 5 [s] sem o emprego de nenhuma técnica de controle.

Figura 40 – Velocidade angular, falta trifásica no barramento do gerador com carregamento de 1,1 [pu]

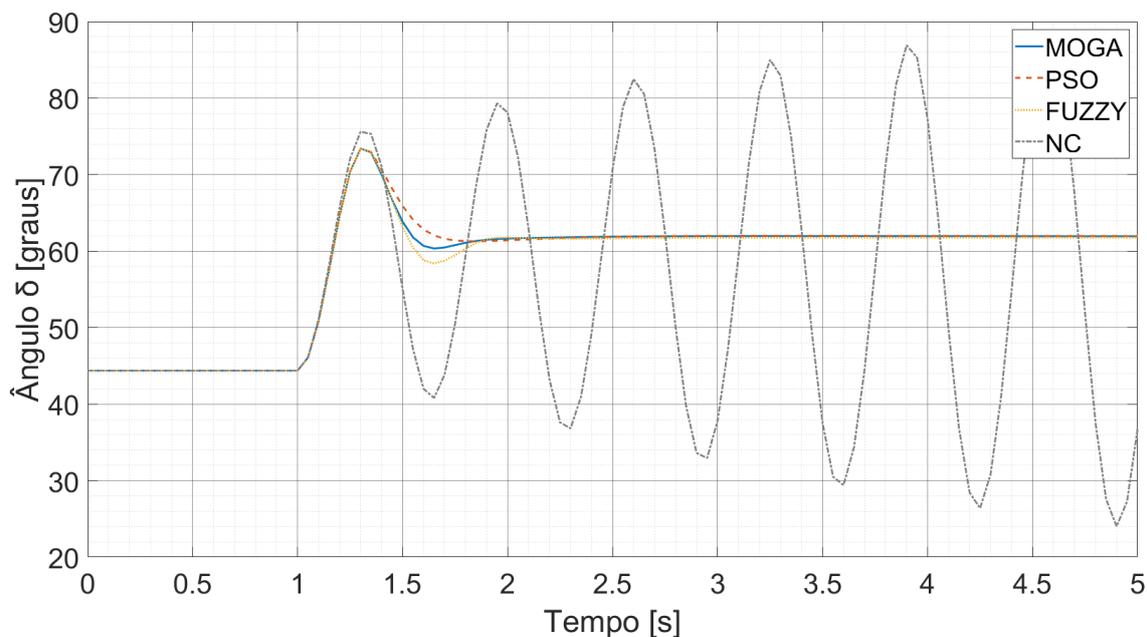


Fonte – Autor

Analisando a Figura 40 percebe-se que a velocidade se mantém nominal até o instante de 1,0 [s] quando a perturbação ocorre. Neste caso a resposta do sistema é diferente da apresentada no cenário anterior e conforme explicado em 2.2.1 agora o Caso 3 da Figura 14. Isto é, uma resposta com uma leve variação inicial que tem sua amplitude aumentada com o passar do tempo. Esta situação tende à instabilidade no longo prazo caso nenhuma medida de controle seja tomada. E por esta razão a utilização das técnicas de controle é indispensável.

As respostas do TCSC com as técnicas do MOGA, PSO e da lógica Fuzzy para as variáveis de deslocamento angular do rotor da máquina, potência elétrica entregue ao barramento infinito, velocidade angular do rotor e a reatância equivalente do circuito estão presentes nas figuras respectivamente.

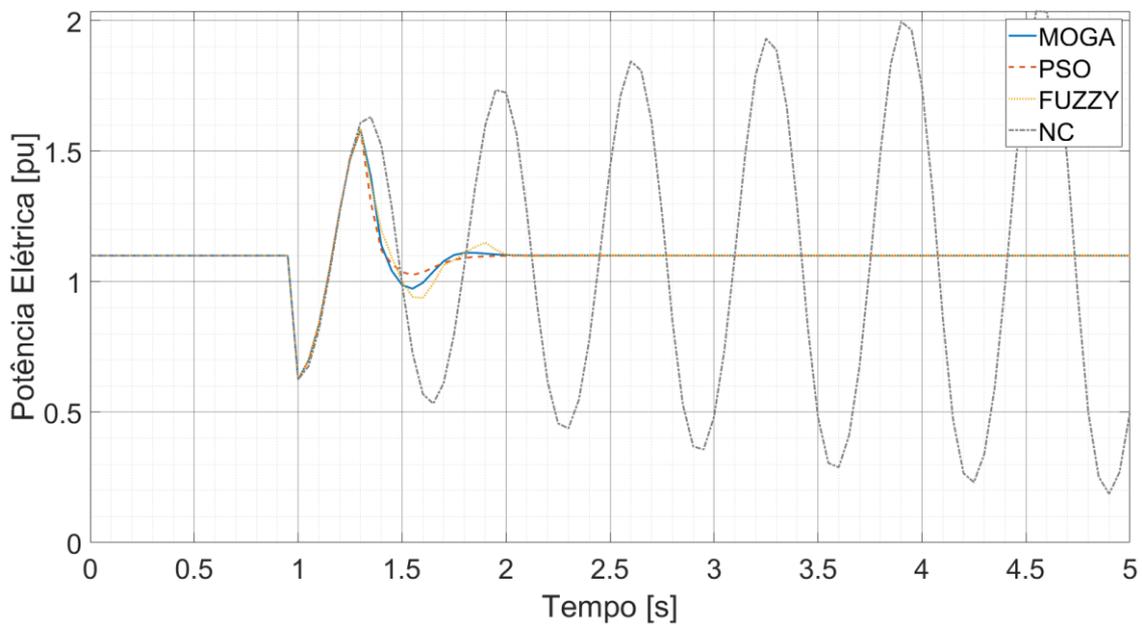
Figura 41 - Variação do ângulo δ em graus no cenário 2



Fonte – Autor

Conforme visto na Figura 41 o novo patamar alcançado de 62° é de uma região instável. Quando não controlado o sistema tende à instabilidade em longo prazo. Neste cenário as três técnicas de controle alcançam a estabilidade, com pequenas diferenças.

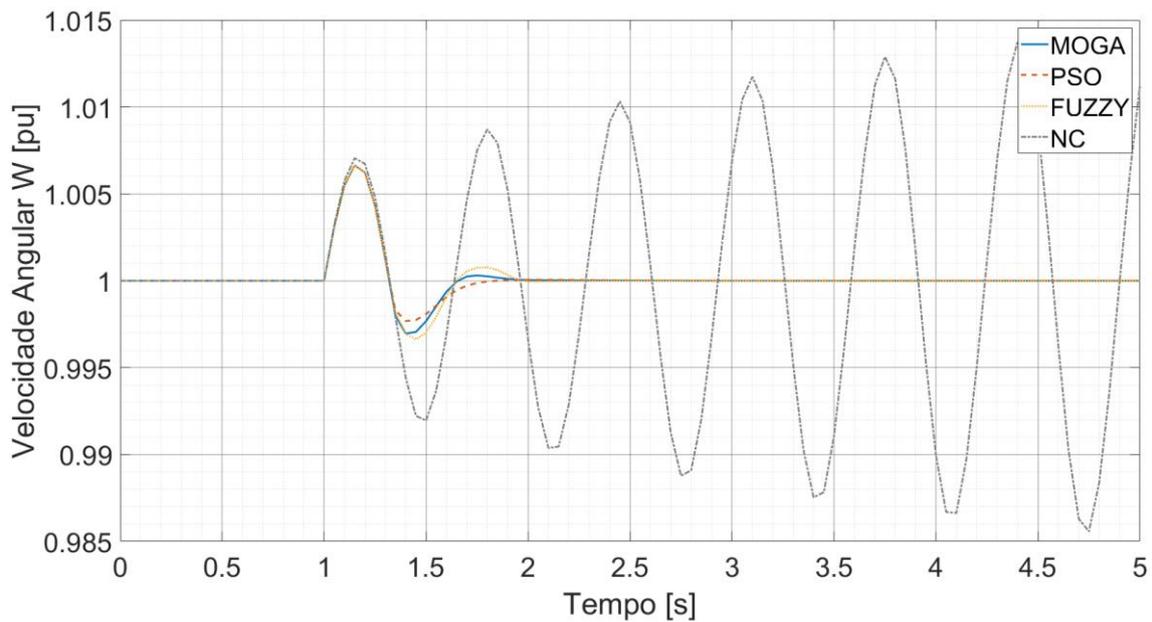
Figura 42 - Variação da potência elétrica em pu no cenário 2



Fonte – Autor

Na Figura 42 vê-se que a potência elétrica transferida ao barramento infinito tem o *overshoot* reduzido quando controlado. O controlador Fuzzy apresenta uma oscilação um pouco maior em tempo até alcança a estabilização, mas retorna à estabilidade em até um segundo após a falta.

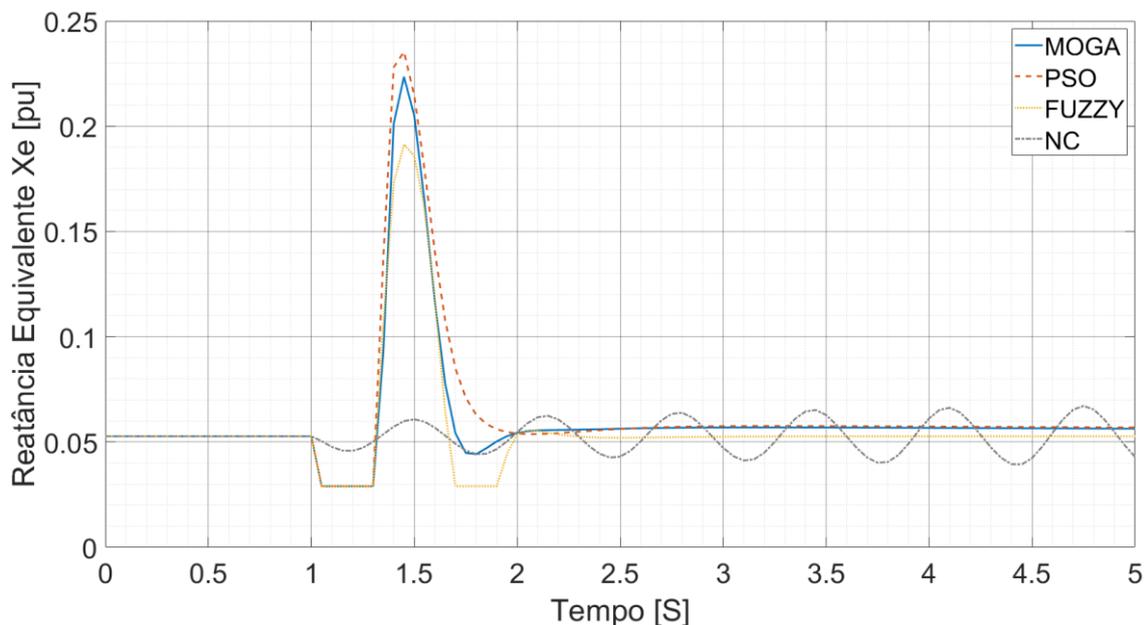
Figura 43 - Variação da velocidade angular em pu no cenário 2



Fonte – Autor

De acordo com a Figura 43, a frequência sofre pouca variação quando está sob as técnicas de controle. Se não controlado, a máquina tende a acelerar em longo prazo aumentando expressivamente a frequência do sistema.

Figura 44 - Variação da reatância equivalente em pu no cenário 2



Fonte – Autor

Na Figura 44 a reatância equivalente do sistema pode-se observar uma atuação menos vigorosa do controlador Fuzzy estendendo-se um pouco mais para controlar os desvios.

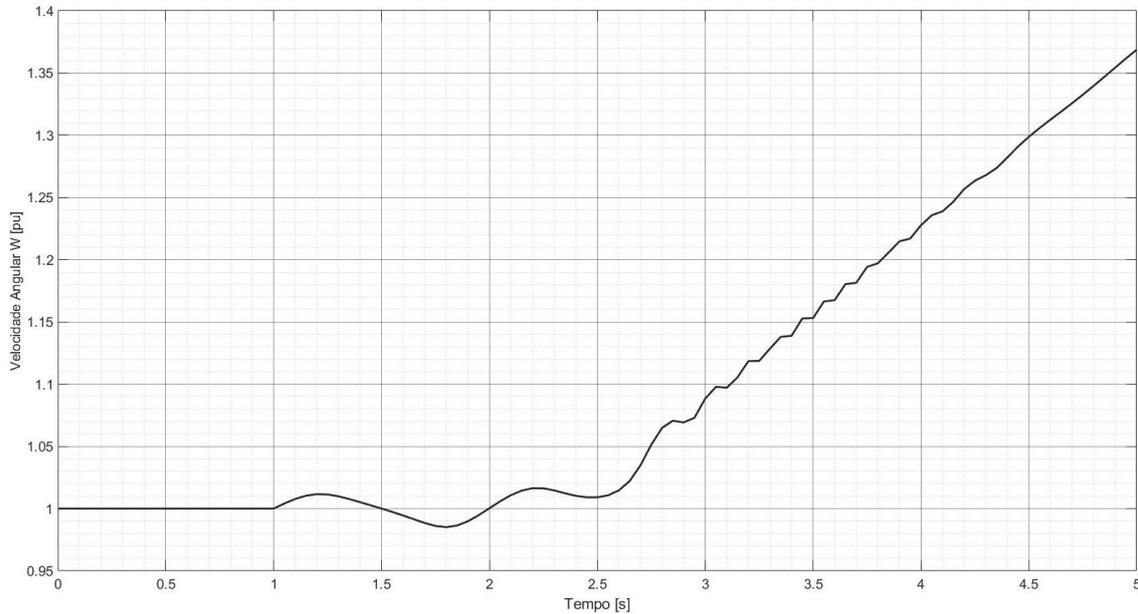
No cenário 2, onde a falta ocorre no barramento do gerador com alto carregamento, pode-se observar que o comportamento entre as técnicas de controle são bem semelhantes aos resultados encontrados no cenário 1. Nesta situação o tempo de equilíbrio do sistema também se dá em até 1,0 [s] após a falta conforme observado nas simulações apresentadas em 4.1. Conforme visto na seção anterior a lógica Fuzzy, neste cenário, também apresenta a respostas similares às demais técnicas.

4.3 FALTA TRIFÁSICA EM UMA LINHA COM CARREGAMENTO NOMINAL

No terceiro cenário simulado, a máquina geradora encontra-se operando em seu carregamento nominal de 1,0 [pu] quando em 1 [s] ocorre uma falta trifásica em uma das linhas de transmissão com duração de 100 [ms]. Após o período do curto a linha é

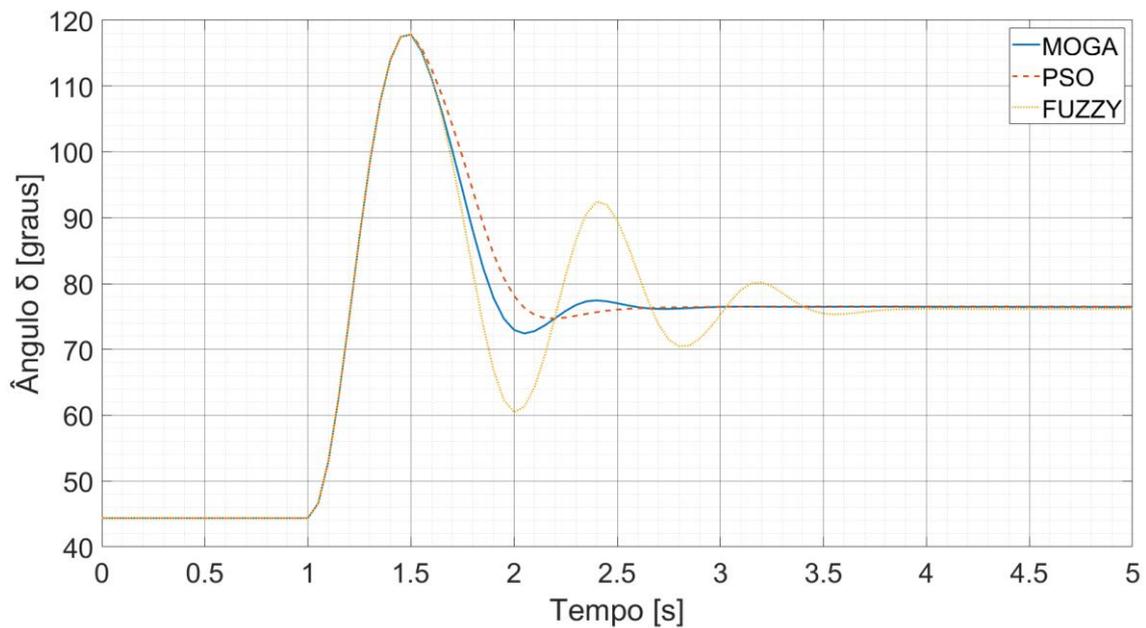
removida do sistema alterando os parâmetros iniciais pré-falta do SMIB. Assim como os casos anteriores, a velocidade angular pré-falta num intervalo de tempo de 5 [s] e sem o emprego de nenhuma técnica de controle será apresentada na Figura 45.

Figura 45 - Velocidade angular, falta trifásica na linha com sua posterior remoção. Carregamento 1,0 [pu]



Fonte – Autor

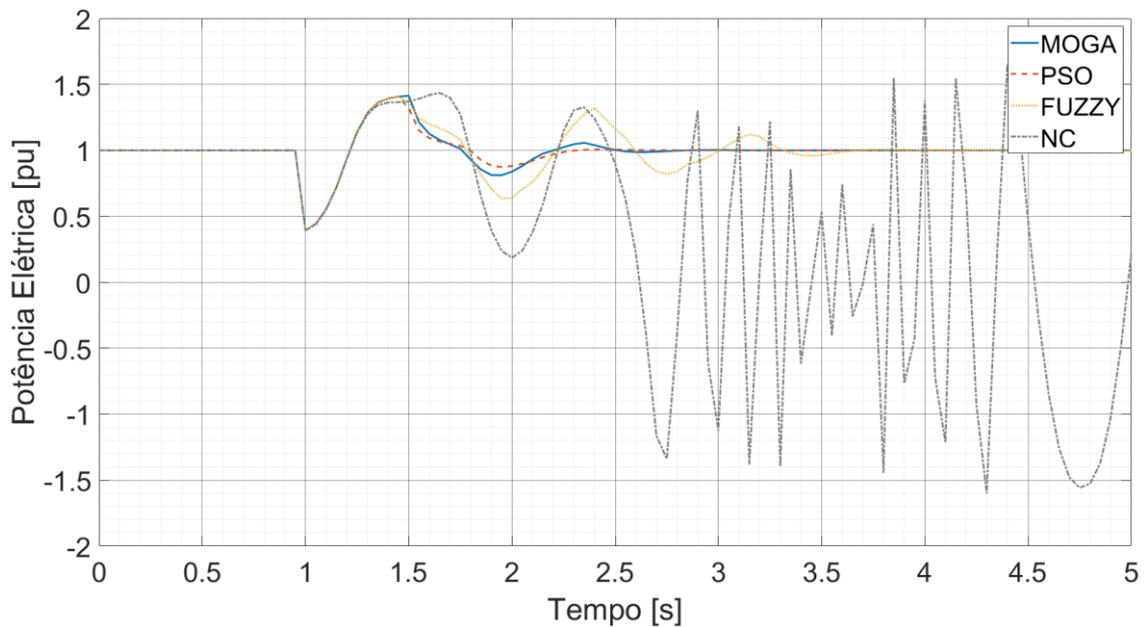
Analisando a Figura 45 percebe-se que a velocidade apresenta o comportamento instável após o instante de 1 [s] quando a perturbação ocorre. Neste caso a resposta do sistema já se encaminha diretamente para a instabilidade conforme no cenário anterior e de acordo com o explicado em 2.2.1 onde o Caso 2 da Figura 14 ocorre. As respostas de controle do TCSC com as técnicas do MOGA, PSO e da lógica Fuzzy para as variáveis de deslocamento angular do rotor da máquina, potência elétrica entregue ao barramento infinito, velocidade angular do rotor e a reatância equivalente do circuito estão presentes nas figuras a seguir.

Figura 46 - Variação do ângulo δ em graus no cenário 3

Fonte – Autor

Nesta Figura 46 a curva não controlada (NC) foi removida devido ao seu comportamento ascendente. O novo ângulo do rotor está na região instável dos 76° . Observa-se comportamento similar nas técnicas heurísticas e certo atraso na resposta do controlador Fuzzy.

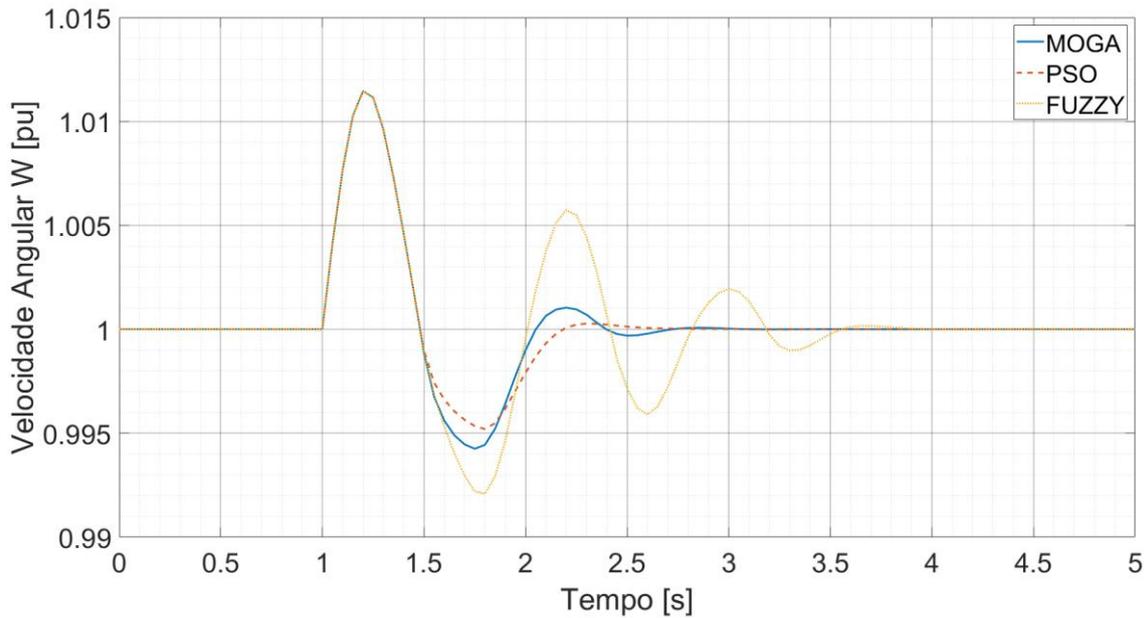
Figura 47 - Variação da potência elétrica em pu no cenário 3



Fonte – Autor

Vê-se na Figura 47 que quando o sistema é não controlado o gerador perde sua estabilidade e a partir do instante 2,5 [s] passa a funcionar, por vezes, como motor (potência elétrica negativa). As três técnicas de controle recuperam a estabilidade do sistema e novamente com certo atraso no controlado Fuzzy.

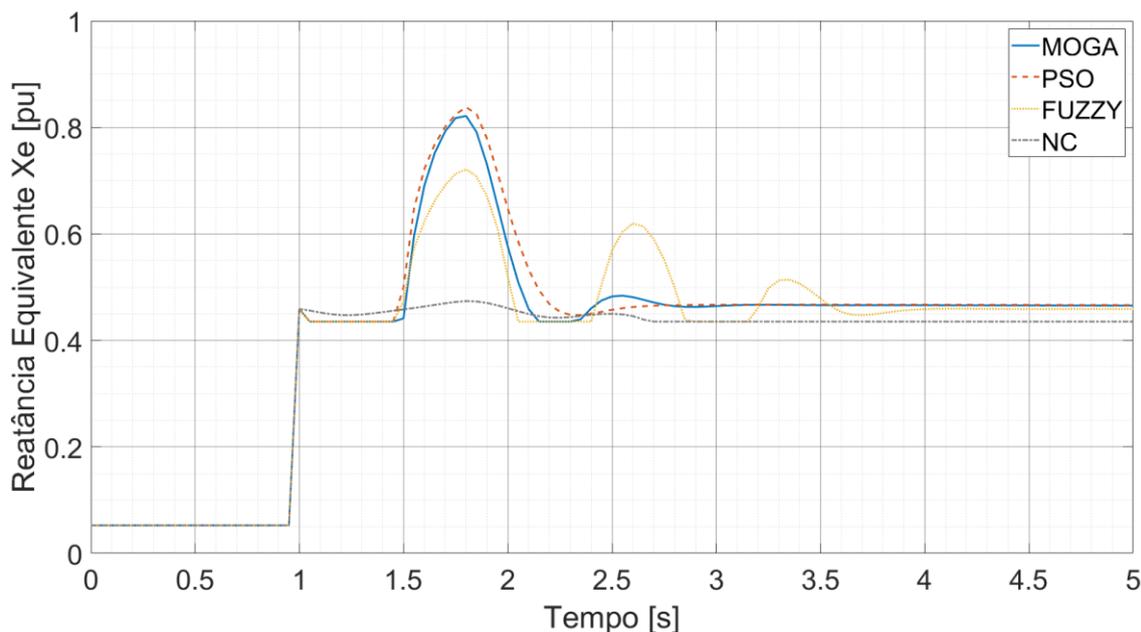
Figura 48 - Variação da velocidade angular em pu no cenário 3



Fonte – Autor

Neste caso, ilustrado pela Figura 48, quando controlado, o sistema tem baixa variação de frequência. Se não controlado a frequência do sistema rapidamente se eleva em um comportamento de rampa condizendo com a aceleração constante da máquina, por este motivo a curva NC também foi removida.

Figura 49 - Variação da reatância equivalente em pu no cenário 3



Fonte – Autor

A reatância equivalente do sistema, no cenário 3, mostrada na Figura 49, possui 2 pontos a serem observados. Antes da falta o paralelismo das linhas resulta em uma reatância menor. Pós falta, a linha faltosa é removida a reatância se eleva. Aqui é possível verificar que o controlador Fuzzy atua de maneira menos intensa logo após a falta o que resulta em mais oscilações aumentando o tempo de controle quando comparado aos modelos *lead-lag*.

Finalmente o cenário 3, onde a falta ocorre em uma das linhas com sua posterior remoção, já não há tantas semelhanças entre as técnicas metaheurísticas e a lógica Fuzzy. É importante notar que nas Figura 46 e 48 (ângulo e velocidade), a curva “Não Controlada” (NC) foi removida por apresentar grande excursão de sinal, tendendo ao infinito, minimizando assim as demais curvas.

Neste tipo de falha a lógica Fuzzy apresentou um maior tempo para estabilizar o sistema após a remoção da linha. Quando se comparam os resultados observam-se mais oscilações e uma recomposição mais demorada ao novo estado estável. O tempo de equilíbrio, para as duas primeiras técnicas foi 1,5 [s] enquanto a estabilidade no controle Fuzzy é alcançada em 2,5 [s] após o início da falta. Quando se compara a reatância equivalente, a lógica Fuzzy apresenta resposta menos agressiva e, por esta razão, o estado estável é lentamente alcançado.

4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS ESTUDADAS

Após a realização das simulações e da observância dos resultados é interessante estabelecer comparações entre as técnicas de controle. Na Tabela 5 tem-se um comparativo entre as características de cada técnica apresentada neste trabalho além do tempo de estabilização do sinal pós falta.

Tabela 5 – Comparativo das técnicas de controle e seus tempos de atuação

Referência	Técnica	População Inicial Guiada	Iterações para Aprimoramento	Funções Membro	Tempo até a Estabilização [s]	
					Cenários 1 e 2	Cenário 3
[15]	MOGA	Sim	Sim	Não	1,0	1,5
[16]	PSO	Sim	Sim	Não	1,0	1,5
Este trabalho	CLF	Não	Não	Sim	1,0	2,5

Fonte – Autor

Analisando os dados presentes na Tabela 5 pode-se observar que há muita semelhança, em termos de tempo, entre as técnicas de controle. Vê-se que o Controlador Lógico Fuzzy alcança a estabilidade em todos os casos simulados com valores muitas vezes iguais aos das técnicas *lead-lag*. No cenário 3 a resposta do CLF é um segundo superior às demais técnicas. Este resultado não desabona a lógica Fuzzy, especialmente pelo motivo de apresentar uma modelagem mais simples quando comparada às técnicas heurísticas. No CLF também não há necessidade de se definir uma solução guiada, grupo de indivíduos ou iterações. Outra vantagem é de que caso haja alterações nos parâmetros do SMIB não será necessário refazer todos os cálculos de aprimoramento como é preciso nas técnicas heurísticas, uma vez definidas as Funções Membro o Fuzzy estará apto a realizar o controle do sistema mesmo com modificações.

5 Conclusões

Tendo em vista a recente expansão do SIN e os novos desafios quanto à regularização de novos grandes empreendimentos para geração e transmissão de energia elétrica e os problemas de estabilidade, percebe-se a relevância dos dispositivos FACTS na composição da Rede Básica. Estes dispositivos visam extrair maior rendimento das atuais instalações além de aprimorar a qualidade e a confiabilidade da rede elétrica sem ser necessário aumentar fisicamente a rede básica. Novas linhas e novas conexões são entregues anualmente e isto vem contribuindo para o aumento da complexidade da operação do sistema de forma harmoniosa entre os subsistemas do país.

Esta dissertação apresentou de forma resumida alguns dos problemas encontrados na operação e na manutenção da estabilidade do SEP. O aumento da utilização dos dispositivos FACTS fez surgir vertentes de estudos em controle, onde muitas opções estão disponíveis aos pesquisadores e ao operador. Percebeu-se que a dificuldade em obter uma metodologia específica é justamente atender aos diferentes objetivos de estabilidade, como por exemplo, a potência elétrica transferida, tensão, a velocidade angular da máquina e o deslocamento do angular do eixo.

Para solucionar o problema multi-objetivos de disparo dos tiristores do TCSC seguindo a estrutura de controle *lead-lag*, dois dos métodos apresentados neste trabalho são estocásticos e, conforme mostrado, requerem um tempo considerável para se realizar a modelagem e as iterações objetivando uma solução aprimorada, mas não perfeita, dos parâmetros de tempo e da constante de ganho. Tanto o Algoritmo Genético (MOGA) quanto o Enxame de Partículas (PSO) de início precisam de um conjunto de soluções possíveis para o sistema, e a partir deste conjunto inicial novas soluções começam a ser testadas e as respostas (cromossomos no MOGA ou partículas no PSO) serão comparadas com uma função objetivo que apresenta parâmetros mínimos a serem atendidos.

A grande dificuldade nestas modelagens é referente à mutabilidade do SEP que, conforme dito no parágrafo inicial e na subseção do Sistema Interligado Nacional, é comum de ocorrer com o passar dos anos. Em certas ocasiões, modificações como o acréscimo de um nó, um novo grupo gerador ou o aumento das linhas de transmissão, irão invalidar as modelagens por ora realizadas, sendo necessário recompilar todos os

parâmetros, modelar o novo sistema e realizar novas iterações. Por esta razão este trabalho se empenhou em propor a utilização da lógica Fuzzy, com regras e funções membros simplificadas, em um sistema resumido (equivalente) e apresentou resultados semelhantes aos métodos estocásticos empregados nos sistema de controle tipo *lead-lag*.

O objetivo principal do trabalho não é invalidar o emprego de outras técnicas de controle, mas sim propor a utilização de um sistema mais simples antes de partir para técnicas mais complexas. Esta proposta pode economizar muito os esforços e o tempo na pesquisa de soluções em controle, especialmente quando o TCSC for considerado para aprimorar a operação de um sistema.

Por fim, este trabalho não é definitivo e não significa que o emprego da lógica Fuzzy terá sucesso em todas as configurações de rede possíveis. Por esta razão novas simulações devem ser realizadas tanto nos sistemas equivalentes tipo SMIB quando em sistemas de barras múltiplas para que conclusões mais detalhadas possam ser apresentadas.

REFERÊNCIAS

- [1] d. P. E. Empresa, “Balanço Energético Nacional - Relatório Síntese,” EPE, Rio de Janeiro, 2022.
- [2] A. N. d. E. Elétrica, *Regras dos Serviços de Transmissão de Energia Elétrica - Módulo 2*, Brasília, 2022.
- [3] Brasil, *DECRETO Nº 5.081, DE 14 DE MAIO DE 2004*, Brasília: Presidência da República, 2004.
- [4] M. a. S. G. Mahdavian, “Effect of STATCOM on enhancing power system dynamic stability,” *The 8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand-Conference*, pp. 780--783, 2011.
- [5] G. S. a. S. A. G. a. M. O. P. a. P. S. a. H.-N. J. B. Chawda, “Comprehensive review of distributed FACTS control algorithms for power quality enhancement in utility grid with renewable energy penetration,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 107614--107634, 2020.
- [6] L. a. S. K. K. a. S. C. D. Gyugyi, “The interline power flow controller concept: a new approach to power flow management in transmission systems,” *IEEE transactions on power delivery*, vol. 14, n. 3, pp. 1115--1123, 1999.
- [7] P. S. a. M. O. P. Kundur, *Power system stability and control*, ISBN-13, 978-1260473544: McGraw-Hill Education, 2022.
- [8] V. a. D. S. R. B. V. Sanjeeva Rao, “Design of power system stabilizer with pi, pd, pid and lead-lag controllers,” *International Journal of Current Research*, vol. Vol. 6, n. Issue 09, pp. 8724-8729, 2014.
- [9] J. A. a. T. N. Jaleel, “A comparative study between PI, PD, PID and lead-lag controllers for power system stabilizer,” *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, pp. 456--460, 2013.
- [10] A. a. A. M. H. a. L. L. a. E. C. L. Akkawi, “Comparative study between various controllers for power system stabilizer using,” *2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems*, pp. 1--5, 2011.
- [11] K. a. o. Ogata, *Modern control engineering*, New Jersey: Prentice Hall, 2010.
- [12] S. a. J. S. K. Meikandasivam, “Behavioral Study of TCSC Device--A MATLAB/Simulink Implementation,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2, n. 9, pp. 1958--1963, 2008.
- [13] S. a. P. R. a. P. N. Panda, “Power system stability improvement by TCSC controller

employing a multi-objective genetic algorithm approach," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 1, n. 7, pp. 553--560, 2006.

- [14] R. M. a. V. R. K. Mathur, Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems, Online ISBN: 9780470546680 : John Wiley \& Sons, 2002.
- [15] S. a. P. N. P. Panda, "MATLAB/SIMULINK based model of single-machine infinite-bus with TCSC for stability studies and tuning employing GA," *International Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 1, n. 3, pp. 560--569, 2007.
- [16] P. R. N. P. P. Panda Sidharta, "Robust Coordinated Design of PSS and TCSC using PSO Technique for Power System Stability Enhancement," *Journal of Electrical Systems*, pp. 109--123, Junho 2007.
- [17] H. a. S. H. a. J. S. a. S. A. Shayeghi, "A PSO based unified power flow controller for damping of power system oscillations," *Energy conversion and management*, vol. 50, n. 10, pp. 2583--2592, 2009.
- [18] A. T. a. A.-M. Y. a. A. M. Al-Awami, "A particle-swarm-based approach of power system stability enhancement with unified power flow controller," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 29, n. 3, pp. 251--259, 2007.
- [19] M. A. M. a. M. O. a. H. G. Hassan, "A fuzzy logic based stabilizer for a synchronous machine," *IEEE Transactions on Energy conversion*, pp. 407--413, September 1991.
- [20] M. a. A. G. a. T. K. Noroozian, "Robust, near time-optimal control of power system oscillations with fuzzy logic," *IEEE transactions on power delivery*, pp. 393--400, January 1996.
- [21] S. a. D. B. a. P. V. Hameed, "Reduced rule base self-tuning fuzzy PI controller for TCSC," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, pp. 1005--1013, 23 02 2010.
- [22] S. a. D. B. a. P. V. Hameed, "A self-tuning fuzzy PI controller for TCSC to improve power system stability," *Electric Power Systems Research*, pp. 1726--1735, 24 04 2008.
- [23] A. a. J. I. S. a. B. H. R. a. N. A. a. A. A. Haroon, "Modeling, control and placement of FACTS devices: A review," *Mehran University Research Journal Of Engineering & Technology*, vol. 39, n. 4, pp. 719--733, 2020.

APÊNDICE A: PROGRAMA EM MATLAB

```

%Ref: PANDA, Sidharta. PADHY, Narayana Prasad
%Desenvolvido por: DAVID, Ítalo
%Orientação: Prof. LIMA, Isaiás

clear all
clc
format long

Sbase = 100.0 ;           % potência base
[MVA]
f      = 60.0 ;           % frequência do sistema
[Hz]

% Gerador
global H Dm Xd Xq Xld Xlq Tld0 Tlq0 Ra Qc d0
H      = 3.542000 ;       % constante inércia [pu]
Dm     = 0.000000 ;       % coeficiente amortecimento [pu]
Xd     = 1.757200 ;       % reatância síncrona eixo direto [pu]
Xq     = 1.584500 ;       % reatância Síncrona eixo quadratura [pu]
Xld    = 0.424500 ;       % reatância transitória eixo direto [pu]
Xlq    = 1.040000 ;       % reatância transitória eixo quadratura [pu]
Tld0   = 6.660000 ;       % cte tempo eixo direto (circ aberto) [pu]
Tlq0   = 0.440000 ;       % cte tempo eixo quadratura (circ aberto) [pu]
Ra     = 0.000000 ;       % cte tempo eixo quadratura (circ aberto) [pu]
Qc     = 0.022240 ;       % [pu]
d0     = 44.37000 ;       % angulo do rotor em graus [deg]
d0R    = d0 * pi/180 ;    % angulo do rotor em radianos [rad]

% Regulador
global Ka Ta
Ka     = 400.0000 ;       % ganho do regulador [pu]
Ta     = 0.025000 ;       % cte de tempo do regulador [seg]

% Sistema
global R Xlt Xtr Xth G B
R      = 0.000000 ;       % resistência linha transmissão [pu]
Xlt    = 0.812500 ;       % reatância linha transmissão [pu]
Xtr    = 0.136400 ;       % reatância transformador [pu]
Xth    = 0.136360 ;       % reatância Thevenin-equiv barra infinita [pu]
G      = 0.000000 ;       % [pu]
B      = 0.000000 ;       % [pu]

% Controlador TCSC
global Ttcsc alfa0 Xtcsc0 k Tw Xmax Xmin
Ttcsc = 0.0150 ;         % [seg]
alfa0 = 142.0000 ;       % angulo de disparo do TCSC em graus [deg]
alfa0R = alfa0 * pi/180 ; % angulo de disparo do TCSC em rad [rad]
sigma0R = 2*(pi-alfa0R) ; % angulo de condução do TCSC em rad [rad]
Xtcsc0 = 0.626290 ;      % [pu]
Kp     = 2.000000 ;       % relação de compensação (Xc/Xp)^1/2 [pu]
Tw     = 10.0000 ;       % [seg]
Xmax   = 0.8 * Xlt ;      % [pu]
Xmin   = 0.000000 ;       % [pu]
Kt     = 32.6247 ;
Tlt    = 0.1464 ;

% Simulação das faltas
CasoSim = 0;
switch CasoSim

```

```

case 0 % Falta trifásica, barramento gerador, carregamento 0,8

% Tempos
Tf_beg = 1.00 ; % instante da aplicação da falta [seg]
Dfault = 5.00 ; % duração da falta: 5 ciclos [ciclos]
Tf_end = Tf_beg + (Dfault / f) ;

% Impedancia equivalente vista pelos terminais da MS
Xeq0 = Xtr + Xlt/2 + Xth ; % antes da falta
Xeqf = 0 ; % durante a falta
Xeqp = Xtr + Xlt/2 + Xth ; % após a falta

% Potencia Mecanica
Pm0 = 0.80 ; % antes da falta
Pmf = 0.80 ; % durante a falta
Pmp = 0.80 ; % após a falta

%Potencia Gerador
Pc = 0.80 ; % [pu]

case 1 % Falta trifásica, barramento gerador, carregamento 1,1

% Tempos
Tf_beg = 1.00 ; % instante da aplicação da falta [seg]
Dfault = 5.00 ; % duração da falta: 5 ciclos [ciclos]
Tf_end = Tf_beg + (Dfault / f) ;

% Impedancia equivalente vista pelos terminais da MS
Xeq0 = Xtr + Xlt/2 + Xth ; % antes da falta
Xeqf = 0 ; % durante a falta
Xeqp = Xtr + Xlt/2 + Xth ; % após a falta

% Potencia Mecanica
Pm0 = 1.10 ; % antes da falta
Pmf = 1.10 ; % durante a falta
Pmp = 1.10 ; % após a falta

%Potencia Gerador
Pc = 1.10 ; % [pu]

case 2 % Falta trifásica, linha de transmissão, carregamento 1,0

Tf_beg = 1.00 ; % instante da aplicação da falta [seg]
Dfault = 0.00 ; % duração da falta: 0 ciclos [ciclos]
Tf_end = Tf_beg + (Dfault / f) ;

% Impedancia equivalente vista pelos terminais da MS
Xeq0 = Xtr + Xlt/2 + Xth ; % antes da falta
Xeqf = 0 ; % durante a falta
Xeqp = Xtr + Xlt + Xth ; % após a falta

% Potencia Mecanica
Pm0 = 1.00 ; % antes da falta
Pmf = 1.00 ; % durante a falta
Pmp = 1.00 ; % após a falta

%Potencia Gerador

```

```

Pc      = 1.00 ;      % [pu]

end

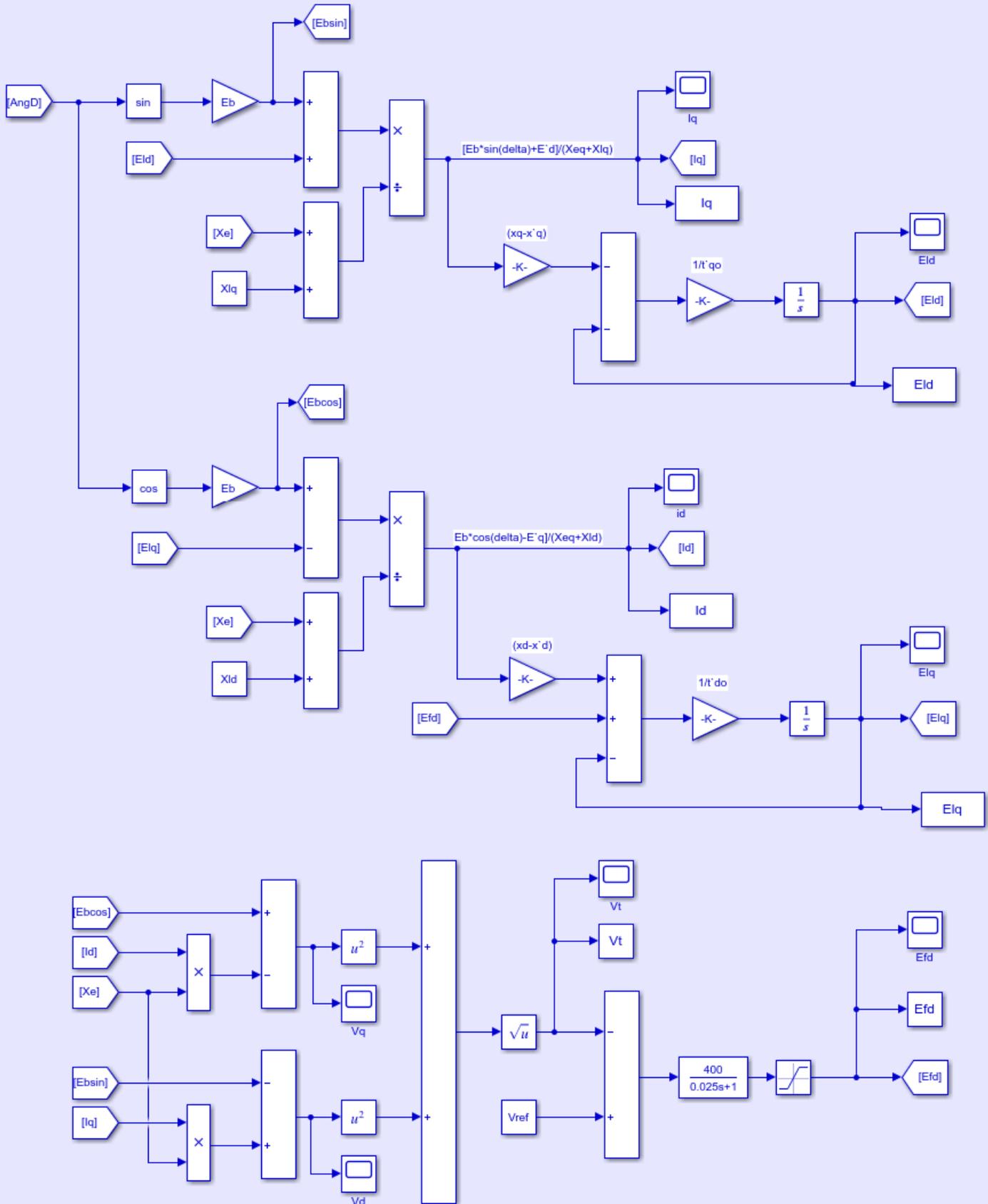
% Modelo E`q
Vt0     = 1.000671960551233*exp(i*0.031616025641852) ; % obtido no
Fluxo de Potencia

Eb      = 1.00;
Pe0     = Pc ;
Pm      = 1.1;

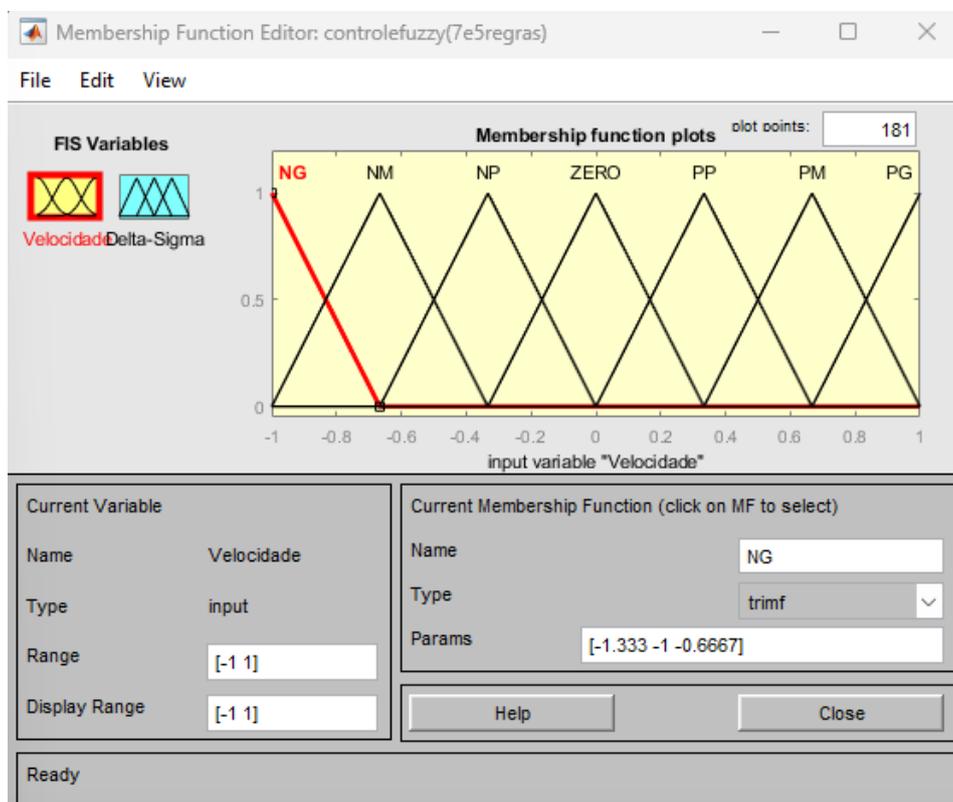
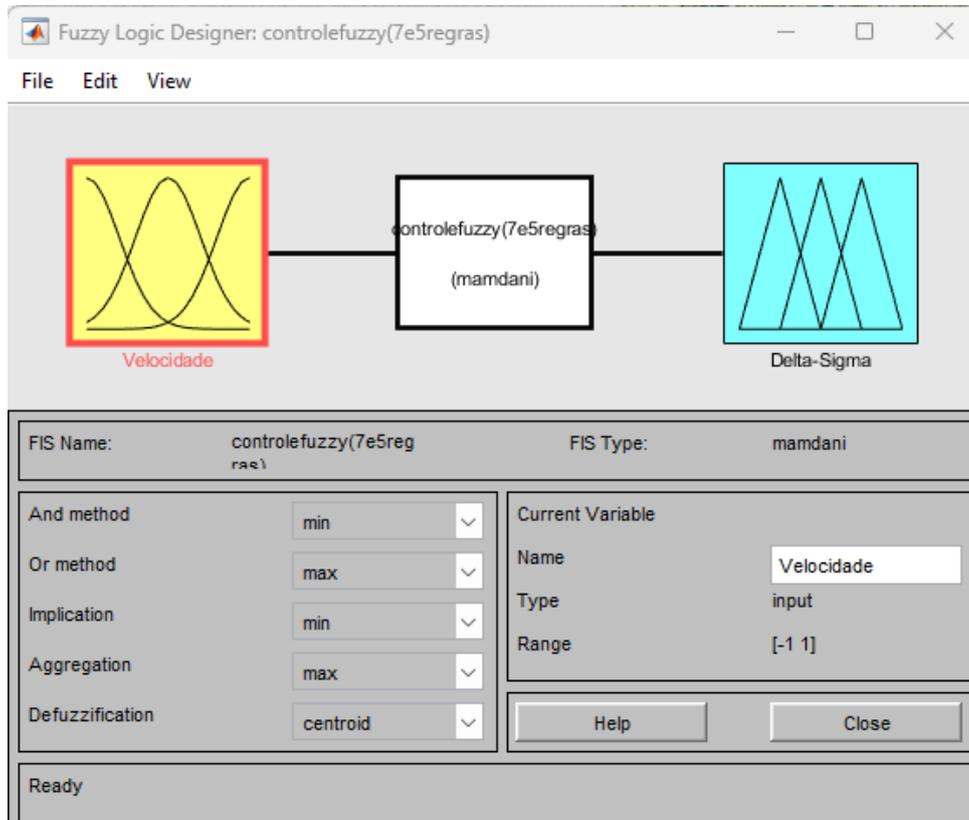
Ia0     = (Pc - i*Qc) / conj(Vt0);
Eq0     = Vt0 + (Ra + i*Xq)*Ia0;
Id0     = -abs(Ia0) * sin(angle(Eq0)-angle(Ia0));
Iq0     = abs(Ia0) * cos(angle(Eq0)-angle(Ia0));
Efd0    = abs(Eq0) - (Xd - Xq)*Id0;
Elq0    = Efd0 + (Xd - Xld)*Id0;
Eld0    = - (Xq - Xlq)*Iq0;
Vref    = abs(Vt0) + Efd0/Ka;

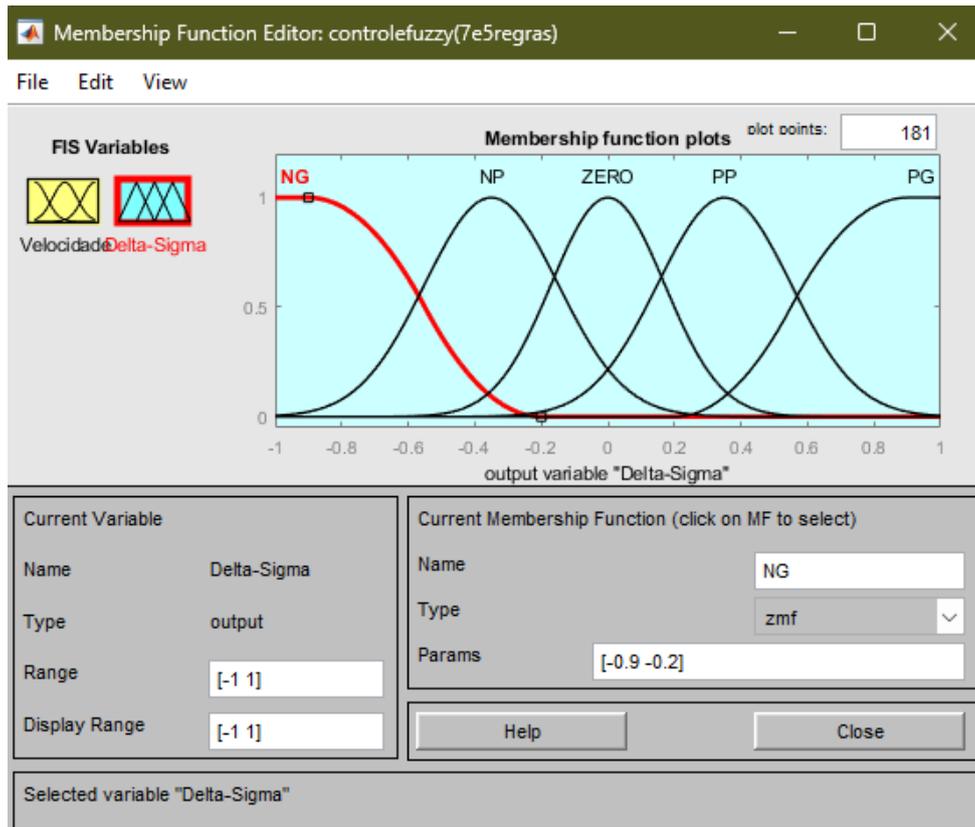
```


Id, Iq, E'd, E'q



APÊNDICE C: LÓGICA FUZZY PROPOSTA





Rule Editor: controlefuzzy(7e5regras)

File Edit View Options

- If (Velocidade is NG) then (Delta-Sigma is NG) (1)
- If (Velocidade is NM) then (Delta-Sigma is NG) (1)
- If (Velocidade is NP) then (Delta-Sigma is NP) (1)
- If (Velocidade is ZERO) then (Delta-Sigma is ZERO) (1)
- If (Velocidade is PP) then (Delta-Sigma is PP) (1)
- If (Velocidade is PM) then (Delta-Sigma is PG) (1)
- If (Velocidade is PG) then (Delta-Sigma is PG) (1)

If Velocidade is

NG
NM
NP
ZERO
PP
PM

not

Then Delta-Sigma is

NG
NP
ZERO
PP
PG
none

not

Connection

or
 and

Weight: 1

FIS Name: controlefuzzy(7e5regras)