UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LUCAS BEORDO

Planejamento da operação de controles de reativo e tensão considerando
restrições de estabilidade de tensão

São Carlos
2018

LUCAS BEORDO

Planejamento da operação de controles de reativo e tensão considerando
restrições de estabilidade de tensão

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Luís Fernando Costa Alberto

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2018

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B481p Beordo, Lucas
Planejamento da Operação de Controles de Reativo e
Tensão considerando Restrições de Estabilidade de
Tensão / Lucas Beordo; orientador Luis Fernando Costa
Alberto. São Carlos, 2018.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Sistemas Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Sistemas Elétricos de Potência. 2. Planejamento
da Operação. 3. Métodos de Otimização. 4. Controle de
Reativos. 5. Estabilidade de Tensão. 6. Controle de
Tensão. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Licenciado e Bacharel **LUCAS BEORDO**.

Título da dissertação: "Planejamento da operação de controles de reativo e tensão considerando restrições de estabilidade de tensão".

Data da defesa: 27/07/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Marcos Julio Rider Flores**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Prof. Dr. **Glauco Nery Taranto**
(Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus e seu filho Jesus Cristo, aos meus pais João Carlos e Leonor, meus irmãos Poliana, Gisele e Mateus, à minha noiva Samantha, meu sogro José Carlos e minha sogra Selma, meus cunhados, meu orientador Luís Fernando e todos que me apoiaram e contribuíram para esta conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e seu filho Jesus Cristo, por me darem forças, sabedoria, paz e condições para realizar este trabalho, pois sem suas mãos sobre mim, para me guiar e proteger, nada na vida seria possível.

Agradeço minha noiva, Samantha, pela paciência, pelo apoio, por sempre estar ao meu lado, pelos conselhos, pelo carinho, por acreditar em mim e por tornar os dias mais aprazíveis ao longo dessa jornada.

Agradeço ao pessoal da seção de pós-graduação da EESC – USP.

Agradeço ao pessoal da biblioteca da EESC – USP, pois sempre estão prontos para nos atender.

Agradeço a todos os funcionários e docentes da USP, por fazerem dessa instituição uma instituição de qualidade.

Agradeço ao professor Luís Fernando Costa Alberto por me aceitar como seu orientado, pela orientação neste trabalho, pelo crédito, pelas correções, conselhos e pela paciência.

Agradeço a minha mãe e a meu pai pela excelente educação que me deram, pela força, pelo carinho, sem eles eu nada seria.

Agradeço aos meus irmãos, pela paciência e companhia desde os tempos de infância até os dias atuais.

Agradeço ao meu sogro, a minha sogra, meus sobrinhos e todo mundo que passou pela minha vida, pois nada é por acaso. A cada dia que passa, sempre aprendemos algo, seja esse algo bom ou ruim.

Agradeço a todos os amigos do LACOSEP e LPS pelo apoio, pela ajuda, conversas, distrações, etc. Em determinados momentos da vida percebemos que precisamos de outras pessoas e que não estamos sozinhos. Foi muito bom poder contar com a ajuda de vocês.

Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

BEORDO, L. **Planejamento da operação de controles de reativo e tensão considerando restrições de estabilidade de tensão**. 2018. 172 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A operação de um Sistema Elétrico de Potência é complexa, principalmente, devido ao grande número de restrições impostas às variáveis e às grandezas do sistema, sejam elas de natureza física ou de requisito para a qualidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica entregue aos consumidores. O gerenciamento das tensões e dos fluxos de potência, ativa e reativa, é crucial para que o SEP opere de modo seguro, com qualidade e com o menor custo. O gerenciamento, das tensões e das potências, é realizado através dos ajustes dos dispositivos de controle do SEP, contudo, determinar os estados dos dispositivos controlados do SEP não é uma tarefa trivial. A determinação dos estados dos dispositivos controlados torna-se ainda mais difícil, pois, para garantir o fornecimento, de energia elétrica, contínuo e de qualidade, diversos cenários (contingências) devem ser analisados e as ações de controle impostas ao SEP devem satisfazer todos os requisitos operacionais do SEP para todos os cenários. Diversos blecautes ocorreram devido à instabilidade de tensão no SEP e quando estão em condições de alto carregamento, o problema torna-se ainda mais evidente. Este trabalho propõe uma ferramenta computacional para o planejamento das ações de controles de reativo e tensão em Sistemas Elétricos de Potência que mantenham, ao longo do dia, as variáveis e as grandezas do sistema dentro da região factível de operação e, ainda, garantam margem de estabilidade de tensão suficiente para que o colapso de tensão seja evitado. Para desenvolver esta ferramenta, o problema de planejamento de controle de tensão e reativo foi formulado como um problema de otimização, onde, neste problema, dois objetivos e metodologias foram realizados. No primeiro, buscou-se determinar os estados dos dispositivos controlados que minimizassem as perdas nas linhas de transmissão dentro de um intervalo de tempo e de potência e, no segundo, determinar os estados dos dispositivos controlados que mantivessem as variáveis e grandezas do sistema dentro da região factível durante o maior intervalo de potência, minimizando, assim, as mudanças nas ações de controle do SEP. Também foi proposta, neste trabalho, uma metodologia para identificação de contingências críticas do SEP. Os resultados obtidos através das resoluções dos problemas indicaram que as formulações propostas são capazes de determinar os estados dos dispositivos controlados do sistema ao longo do dia, de modo a garantir que não ocorressem violações nas restrições operacionais do sistema enquanto houvesse medidas de controle, onde foi considerado o caso base e uma lista de contingências. Além disso, as margens de estabilidade de tensão do caso base e das contingências foram sempre mantidas acima do valor de segurança especificado. Os resultados também mostraram que a metodologia para identificação da contingência crítica proposta é capaz de identificar a contingência que limita o crescimento de carga do sistema, de modo a garantir que o SEP esteja operando com o menor risco à instabilidade de tensão, mantendo as variáveis e as grandezas do sistema dentro da região factível para o maior número de cenários.

Palavras-chave: Sistemas Elétricos de Potência. Planejamento da Operação. Métodos de Otimização. Controle de Reativos. Estabilidade de Tensão. Controle de Tensão.

ABSTRACT

BEORDO, L. **Operation planning of reactive and voltage controls considering voltage stability constraints**. 2018. 172 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

The operation of an Electric Power System is complex, mainly due to the great number of restrictions imposed on the variables and the magnitudes of the system, whether of a physical nature or a requirement for the quality and continuity of the electricity supply delivered to consumers. The management of voltage and the power flow, active and reactive, is crucial for the safely operation of the Electric Power System, with quality and low cost. The management of the voltages and powers is performed through the adjustments of the Electric Power System control devices, however, determine the states of the Electric Power System controlled devices is not a trivial task. The determination of the states of the controlled devices becomes even more difficult, since, to guarantee the supply of electricity, continuous and of quality, several scenarios (contingencies) must be analyzed and the control actions imposed on the Electric Power System must satisfy all the Electric Power System operational requirements for all scenarios. Several blackouts occurred due to the voltage instability in the Electric Power System and when they are in high load conditions, the problem becomes even more evident. This work proposes a computational tool for the planning of the actions of reactive and voltage controls in Electric Power Systems that maintain, throughout the day, the variables and the magnitudes of the system within the feasible region of operation and, also, guarantee voltage stability margin sufficient to avoid the voltage collapse. To develop this tool, the planning problem of voltage control and reactive control was formulated as an optimization problem, where, in this problem, two objectives and methodologies were used. In the first one, it was tried to determine the controlled devices states that minimize the transmission lines losses at a time and power interval, and, in the second, to determine the controlled devices states that maintain the variables and quantities of the system within feasible region during the largest power interval, thus the control actions changes in the Electric Power Systems are minimize. Was also proposed, in this work, a methodology for identify the critical contingencies of Electric Power Systems. The results obtained through problem resolutions indicated that the proposed formulations are able to determine the controlled devices states of the system throughout the day, so that there were no violations of the system's operational constraints while there were control measures, assessment the base case and a list of contingencies. In addition, the base case and contingencies voltage stability margins have always been maintained above the specified safety value. The results also showed that the methodology for the identification of the critical contingency is able to identify the contingency that limits the system load growth, in order to ensure that the Electric Power Systems is operating with the lowest risk to voltage instability, maintaining the system variables and magnitudes within the feasible region for the largest number of scenarios.

Keywords: Electric Power Systems. Operation Planning. Optimization Methods. Reactive Control. Voltage Stability. Voltage Control.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Contribuições do Trabalho	29
1.2. Organização do Trabalho.....	30
2. PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE UM SEP	33
2.1. Introdução.....	33
2.2. Requisitos operacionais para a operação de um SEP.....	34
2.3. Curvas PV e QV	36
2.4. Margem de estabilidade de tensão.....	37
2.4.1. Influência das contingências nos níveis de tensão e na MET do SEP.....	39
2.5. Estados operativos do SEP	41
2.5.1. Influência das ações de controle na margem de carregamento, nos níveis de tensão, nas perdas do SEP e nas potências reativas geradas	43
2.5.1.1. Influência da posição dos <i>Tap's</i> dos transformadores.	44
2.5.1.2. Influência da compensação reativa nos níveis de tensão e no PMC.....	45
2.5.1.3. Influência da tensão de referência dos geradores nos níveis de tensão e no PMC.....	47
2.5.2. Classificação das ações de controle no planejamento e na operação do SEP. ...	49
2.6. Considerações Finais.....	51
3. FORMULAÇÕES, MÉTODOS E ESTRATÉGIAS PARA REALIZAR O PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE UM SEP.....	55
3.1. Curvas de carga horária do SEP	57
3.2. Discretização intervalar do período de análise do SEP	62
3.3. Formulações gerais para os problemas que determinam as ações de controle do SEP.....	65
3.3.1. Variáveis do SEP.....	65
3.3.2. Restrições de desigualdade.....	66
3.3.3. Restrições de igualdade	68
3.3.4. Função objetivo	69
3.3.5. Formulação para o problema de determinação das ações de controle do SEP em um nível de carregamento especificado S_0 avaliando somente o caso base.....	70
3.3.6. Formulação para problema de determinação das ações de controle do SEP em um nível de carregamento especificado S_0 avaliando o caso base e a lista de contingências.....	73

3.3.7.	Formulação para o problema de determinação das ações de controle de um SEP considerando um intervalo de acréscimo de carga $S_0+\Delta S$ avaliando o caso base	76
3.3.8.	Formulação para o problema de determinação das ações de controle de um SEP considerando um intervalo de acréscimo de carga $S_0+\Delta S$ avaliando o caso base e a lista de contingências	79
3.4.	Formulação proposta para determinar as ações de controle do SEP que minimizam as perdas nas linhas de transmissão, garantem os requisitos operacionais, inclusive as restrições de MET mínima de segurança, satisfeitas durante um acréscimo de carga especificado	81
3.4.1.	Determinação da sequência das ações de controle para realizar o planejamento da operação do SEP que minimiza as perdas nas linhas de transmissão.....	84
3.5.	Metodologia para identificação das contingências críticas do SEP	87
3.6.	Planejamento da operação de um SEP minimizando as perdas nas linhas de transmissão e o risco operacional do sistema	97
3.7.	Formulação para o problema de determinação das ações de controle de um SEP considerando um intervalo de acréscimo de carga $S_0+\Delta S$ e a MET avaliando o caso base e a lista de contingências maximizando a margem de carregamento	102
3.7.1.	Planejamento da operação de um SEP maximizando a margem de carregamento e minimizando as modificações nas ações de controle	105
3.8.	Considerações Finais.....	107
4.	RESULTADOS	109
4.1.	Resultados do planejamento da operação do SEP	117
4.2.	Comparação entre as perdas nas linhas de transmissão analisando somente o caso base e o caso base mais a lista de contingências	128
4.3.	Resultados do planejamento da operação do SEP minimizando as perdas nas linhas de transmissão e o risco operacional do sistema	131
4.4.	Planejamento das ações de controle para as contingências críticas do SEP	144
4.5.	Resultados do planejamento da operação do SEP minimizando o número de vezes em que as ações de controle são modificadas ao longo do dia.....	148
4.6.	Comparação entre as duas estratégias, propostas, para o planejamento da operação do SEP	159
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	165
5.1.	Perspectivas Futuras	169
	REFERÊNCIAS	171

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Problemas relacionados à instabilidade de tensão vêm se tornando uma das preocupações em Sistemas Elétricos de Potência (SEP), pois alguns dos recentes blecautes em Sistemas Elétricos de Potência ocorreram devido a problemas de estabilidade de tensão. Fatores econômicos e ambientais, juntamente com o crescimento, a complexidade e a interligação dos sistemas e os requisitos relativos à qualidade da energia elétrica (tensão, frequência e fornecimento contínuo) e segurança forçam o sistema a operar próximo aos seus limites. Quando estão em condições de alto carregamento, devido às limitações físicas dos elementos do SEP e a dificuldade de transferir grandes quantidades de potência reativa por longas distâncias, o problema de instabilidade de tensão torna-se ainda mais evidente. Diante a esses fatos, a consideração das restrições de estabilidade de tensão nos estudos do planejamento da operação e do planejamento dos SEP torna-se uma das principais motivações para diversas pesquisas na área de Sistemas Elétricos de Potência.

Cabe ao operador do sistema planejar a operação do SEP ao longo do dia. O planejamento da operação consiste em determinar as ações de controle que manterão os requisitos operacionais do SEP satisfeitos ao longo de toda a operação, isto é, o operador do sistema deve determinar e impor ações de controle ao SEP de tal modo que as cargas sejam sempre atendidas e os requisitos de qualidade e segurança sempre satisfeitos. Além disso, o operador deve conhecer o quanto a demanda no sistema pode variar sem que haja violações nas restrições operacionais e, por motivos de segurança, deve garantir que exista margem de estabilidade de tensão mínima, a fim de evitar o colapso de tensão no sistema. Quando necessário, o operador deve determinar e impor medidas de controle preventivas e/ou corretivas para garantir que as cargas do SEP continuem sendo atendidas cumprindo os requisitos da operação e de segurança.

Além de garantir que o sistema esteja operando cumprindo todos os requisitos de operação para a configuração topológica corrente, denominada de caso base, o operador do SEP deve garantir que o SEP seja robusto e confiável, isto é, em casos de contingências, os requisitos de operação e de segurança devem continuar sendo satisfeitos. Cada país possui um órgão responsável pela operação do sistema e por determinar os critérios que devem ser atendidos para uma operação contínua, segura e de qualidade. Devido à grande dimensão do

SEP, à variedade de dispositivos de controle, de contingências e de limites operacionais, torna-se complexa a operação do sistema elétrico de potência e, portanto, é extremamente importante desenvolver ferramentas para a análise dos SEP, de modo a auxiliar o operador na determinação das medidas de controle necessárias para garantir que o SEP esteja operando em segurança.

A utilização de métodos de otimização para resolver problemas não lineares, não diferenciáveis e de alta dimensão vem crescendo nos últimos anos (Halacli e Demiroren, 2016). Muitos trabalhos utilizam variados métodos de otimização para resolver diferentes problemas, tais como: encontrar a alocação ótima para novos dispositivos compensadores de potência reativa e fontes de geração distribuída no SEP, melhorar o perfil de tensão do sistema, reduzir as perdas nas linhas de transmissão, aumentar a margem de estabilidade de tensão (MET) e as reservas de potência reativa do SEP e minimizar a criticidade das contingências e/ou o número de contingências críticas do SEP.

Em (Rao e Rao, 2015), por exemplo, os autores utilizaram o método de otimização para determinar a alocação ótima de dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*). O problema foi formulado analisando as funções de sensibilidade da função objetivo, reduzir perdas e carregamento nas linhas de transmissão, em relação aos parâmetros dos dispositivos.

Em (Amrane, Boudour e Belazzoug, 2015), também foi proposta a alocação ótima para novos dispositivos compensadores de potência reativa, identificando as barras críticas do SEP, calculando o déficit de potência reativa que é necessário para manter a margem de estabilidade de tensão do SEP e, em seguida, minimizando os custos de instalação dos dispositivos FACTS através dos métodos de otimização de pontos interiores (MPI) e PSO (*Particle Swarm Optimization*).

Em (Halacli e Demiroren, 2016), os autores utilizaram o método de otimização PSO para realizar o ajuste dos parâmetros dos dispositivos FACTS, minimizar os desvios no perfil de tensão e manter o SEP estável.

Em (Sujin *et al.*, 2010) os autores formularam o problema para determinar as ações de controle que minimizam os custos de operação do SEP. A formulação proposta foi resolvida através do método de otimização PSO, sendo considerados, nesta formulação, os custos de

geração, os custos de instalação de novos dispositivos compensadores de potência reativa e os custos relativos às perdas de potência ativa nas linhas de transmissão.

Em (Larki *et al.*, 2009) foi proposta uma metodologia para determinar a melhor barra para a instalação de dispositivos FACTS e compensadores estáticos (*Static Var Compensator* - SVC) simplesmente verificando o ponto de máximo carregamento do SEP. Em (Lakkireddy *et al.*, 2015) os autores realizaram um estudo semelhante, determinando a barra através da avaliação de dois índices, VCPI (*Voltage Collapse Proximity Index*) e LSI (*Line Stability Index*).

Analisando os resultados destes trabalhos, verificou-se, principalmente, a eficácia em utilizar os métodos de otimização para resolver os problemas propostos, indicando ao operador do sistema a melhor localização para a instalação de novos dispositivos e as barras mais vulneráveis do sistema, sendo muito úteis para o planejamento do SEP. Contudo, antes de realizar altos investimentos no SEP, é necessário verificar se esses investimentos são justificados, sendo necessário verificar se os recursos já existentes no sistema não são capazes de garantir uma operação segura.

Em (Amrane, Boudour, Ladjici, *et al.*, 2015) e (Basu, 2016), por exemplo, os autores utilizaram o algoritmo diferencial evolutivo (ADE) para determinar os despachos de potência reativa, as tensões terminais dos geradores, a posição dos *Tap's* dos transformadores e a compensação de reativos dos bancos de capacitores, a fim de minimizar as perdas nas linhas de transmissão, maximizar o ponto de máximo carregamento e minimizar os desvios de tensão do SEP.

Em (Jeong e Chung, 2016) os autores utilizaram a programação dinâmica para otimizar o despacho de potência reativa, o perfil de tensão de um sistema de distribuição, minimizar as perdas e aumentar o fator de potência do sistema, utilizando como variáveis de controle os *Tap's* de transformadores, os bancos de capacitores e recursos de geração distribuída existentes no sistema.

Em (Mousavi e Cherkaoui, 2013), os autores realizaram o fluxo de potência ótimo para determinar as ações de controle do SEP. Neste trabalho foram consideradas duas abordagens. A primeira abordagem realiza uma otimização centralizada, onde o controlador central do SEP determina os objetivos e critérios para cada TSO (*Transmission System Operators*) e a solução obtida de cada TSO deve, além de satisfazer as restrições de operação

do sistema da sua área, deve minimizar o fluxo de potência entre as áreas adjacentes. A segunda abordagem realiza uma otimização descentralizada. Na segunda abordagem, cada operador otimiza o sistema de acordo com seus critérios, consequentemente, decisões tomadas em uma área afetam áreas vizinhas. Devido à diferença entre os métodos e objetivos de cada TSO e a limitação das informações do SEP em áreas adjacentes, nem sempre o ponto de operação do sistema está globalmente otimizado, implicando na redução da reserva de reativos e, consequentemente, na redução da margem de estabilidade de tensão do SEP.

Em (Huang et al., 2017), os autores propõem um método para identificação de controles preventivos e emergenciais quando o SEP fica sujeito à desastres naturais. Desastres naturais podem causar blecautes e são responsáveis por 80% das interrupções no fornecimento de energia elétrica, causando prejuízos de milhões de dólares na economia dos Estados Unidos. Os autores definem o conceito de resiliência do SEP como sendo a capacidade do SEP, através de redes inteligentes, de realizar mudanças topológicas e se adaptar diante aos desastres naturais, ou eventos de alto impacto, e sua habilidade de recuperação após os desastres.

Analisando os resultados destes trabalhos, pôde-se verificar que, na maioria das vezes, é possível manter o SEP operando, cumprindo todos os requisitos operacionais, com os recursos já existentes do SEP e, para isto, é imprescindível gerenciar corretamente estes recursos.

Contudo, devido ao constante aumento na demanda do SEP ao longo do dia, em algum momento esses recursos podem não ser mais capazes de manter todos os requisitos operacionais do sistema, simultaneamente, satisfeitos para o caso base e as contingências. Diante a isso, o operador do SEP pode continuar o planejamento da operação do SEP, determinando as ações de controle que mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos para a maioria das contingências e determinar medidas de controle alternativas para as contingências críticas. Sendo necessário, portanto, determinar quais são as contingências críticas do sistema e quais medidas de controles podem ser adotadas para evitar violações nas restrições operacionais e o colapso de tensão no SEP se acaso a contingência crítica ocorrer.

Em (Mansour *et al.*, 2013), por exemplo, os autores propuseram um método para determinar os controles preventivos que aumentam a MET de cada contingência crítica. A determinação, desses controles preventivos, foi realizada através do cálculo das sensibilidades do PMC do sistema em relação aos dispositivos de controle. A formulação, para a análise das

sensibilidades, através das equações do método Look-Ahead torna o método rápido e adequado para aplicações em tempo real.

Utilizando as formulações de (Mansour *et al.*, 2013), os autores propõem em (Mansour *et al.*, 2016) uma nova metodologia para seleção desses controles preventivos. A metodologia determina um conjunto de ações de controle que eliminam, simultaneamente, a criticidade de múltiplas contingências. A metodologia foi dividida em duas fases, na primeira fase é realizado o cálculo e a normalização das sensibilidades do PMC em relação aos controles disponíveis para todas as contingências críticas. A segunda fase verifica a existência de controles redundantes, a fim de minimizar os custos relacionados a cada tipo de controle.

Em (Jinquan *et al.*, 2006), foi proposto um método para determinar as ações de controle que garantem MET para todas as contingências do SEP. Primeiramente, todas as margens de estabilidade de tensão das contingências são calculadas através do fluxo de carga continuado e, para as contingências críticas, determinam-se, através da matriz de sensibilidade, os controles candidatos para aumentar a MET. A seleção desses controles é realizada através do método de programação linear. O problema é resolvido até que as margens de estabilidade de tensão de todas as contingências sejam maiores que o valor de referência.

Em resumo, podemos observar, na breve revisão bibliográfica apresentada, como o controle de tensão, o gerenciamento de potência reativa do SEP, a garantia de MET mínima de segurança, a minimização dos custos, a seleção e determinação de medidas de controles são motivadores para diversas pesquisas e também como são desafiadores devido ao grande número de controles disponíveis, ao grande número de contingências, a grande dimensão dos sistemas elétricos e a presença de diferentes dispositivos de controle com custos operacionais muito distintos.

Determinar as ações de controle necessárias para gerenciar os recursos do sistema, manter os requisitos de qualidade e segurança satisfeitos resolvendo o problema através de métodos de otimização aparece como uma alternativa natural na formulação para este problema. O problema de otimização pode ser formulado para determinar ações de controle globais para satisfazer, simultaneamente, diversos requisitos do sistema.

Cabe salientar que, até onde conhecemos, as formulações e metodologias propostas encontradas na literatura para os problemas que determinam as ações de controle do SEP não

garantem que todos os requisitos operacionais do SEP sejam satisfeitos, isto é, a solução obtida, através da resolução destas metodologias e formulações, não garante que todas as restrições do SEP sejam satisfeitas nem para o caso base e nem para as contingências.

Por exemplo, considere um instante de tempo t_i qualquer e sejam $S_0(t_i)$ as potências especificadas nas barras do SEP neste instante de tempo. Podemos afirmar que as ações de controle determinadas em um problema que avalia o sistema somente em $S_0(t_i)$ não garantem que o SEP continue operando, para a condição topológica atual, sem violações nas restrições diante a um aumento ΔS qualquer na demanda do SEP e nem que a MET seja, no mínimo, igual ao valor mínimo de segurança especificado. Além disso, por avaliar somente o caso base, não existe garantia que qualquer requisito do SEP seja satisfeito para as contingências, podendo conduzir o sistema ao colapso de tensão se acaso alguma contingência ocorrer. Para verificar qual o aumento na demanda conduz o SEP a violar os limites de operação ou mensurar a MET do sistema, deve-se realizar um fluxo de carga continuado para o caso base e para cada contingência do sistema.

Se acaso, mediante a uma pequena variação na demanda $S = S_0 + \Delta S$, alguma restrição operacional do sistema for violada, o problema deve ser resolvido novamente em S , de modo a determinar novas ações de controle e evitar a ocorrência dessas violações nas restrições. Caso o problema esteja relacionado com o valor da MET, o operador do sistema deverá, intuitivamente, adotar medidas de controle para tentar aumentar a MET, chaveando banco de capacitores, aumentando as tensões de referência dos geradores, alterando $TAP's$ dos transformadores e, para cada conjunto de alterações nas ações de controle do SEP, realizar novamente o fluxo de carga continuado, averiguar os resultados e se o problema de MET mínima foi resolvido, além de verificar se os outros requisitos do SEP continuam sendo satisfeitos.

Cabe salientar também que, diversas pesquisas avaliam índices para obter informações sobre a estabilidade do sistema. Estes índices fornecem de modo indireto informações sobre a estabilidade de tensão do SEP, mas não garantem que o sistema permanecerá estável mediante a uma pequena variação na demanda do SEP. Por exemplo, em (Lobato et al., 2001; Ferreira, 2018) os autores utilizaram, na formulação do problema, a função objetivo para minimizar as perdas nas linhas de transmissão e o índice MR, denominado de margem de reativos. Este índice é a somatória da potência reativa gerada de cada gerador em relação à sua capacidade máxima de geração de potência reativa (1.1).

$$RM_{Total} = \sum_g RM_g = \sum_g \left(\frac{Q_g}{Q_g^{max}} \right)^2 \quad \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\} \quad (1.1)$$

onde,

- Ω_{PV} é o conjunto de barras de geração do tipo *PV*
- $\Omega_{\theta V}$ é a barra de geração e referência do SEP (θV)
- Q_g é o valor calculado da potência reativa gerada pelo gerador conectado a barra g
- Q_g^{max} é o valor máximo de geração de potência reativa do gerador conectado a barra g
- RM_g é o valor da Margem de Reativo do gerador conectado a barra g

Resolvendo este problema determinam-se as ações de controle do SEP que minimizam as perdas e o índice RM_{Total} , maximizando a reserva de reativos do SEP. Contudo, não é garantido que esta reserva seja capaz de manter o sistema estável mediante a um pequeno aumento na demanda do sistema, nem garante que a MET seja, no mínimo, igual ao valor da margem de estabilidade de tensão mínima de segurança especificada. Além disso, nada poder ser dito em relação às contingências, pois o índice é calculado somente para o caso base.

Nestes trabalhos, também foi utilizado um fator δ para ponderar os dois objetivos da função, minimizar as perdas e minimizar o índice RM_{Total} , tornando a metodologia menos confiável em relação à estabilidade de tensão, pois, dependendo da ponderação, a minimização das perdas pode ser priorizada na resolução do problema e a margem de reativos menosprezada e vice-versa, deixando o SEP mais próximo ou mais distante da instabilidade.

Mesmo considerando que o problema de otimização proposto minimize apenas o índice RM_{Total} , sem considerar as perdas, por mais que o problema busque aumentar a reserva de reativos do SEP, através dos ajustes das variáveis de controle, não é possível afirmar que o sistema possui MET, no mínimo, igual ao valor especificado, pois o problema de otimização garante apenas que existe um determinado valor de reserva de reativos e para obter o valor da MET ou averiguar se a mesma é, no mínimo, igual a um valor especificado, é necessário resolver diversos fluxos de carga.

Em face ao exposto, para evitar violações nas restrições operacionais e garantir MET mínima igual ou superior ao valor mínimo de segurança especificado, duas estratégias foram propostas neste trabalho.

A primeira estratégia consiste em dividir todo o período da análise em intervalos de potência/tempo, de tal modo que o tempo entre um intervalo e outro seja suficiente para determinar e aplicar as ações de controle obtidas na resolução do problema. Neste trabalho, seguiremos a premissa de que o comportamento da demanda do SEP é conhecido ao longo de todo o período analisado, isto é, para todos instantes de tempo, ao longo do dia, sabe-se exatamente quais são os valores das potências ativas e reativas em cada barra do sistema. Sendo $S(t)$ a função que descreve o comportamento das potências do SEP ao longo do dia, nesta primeira estratégia, subdivide-se o período para a análise em n intervalos, obtendo-se para cada instante de tempo $t_0, t_1, \dots, t_n$ as correspondentes potências $S(t_0), S(t_1), \dots, S(t_n)$ nas barras do SEP.

É importante mencionar que as variações no tempo estudadas, nesta dissertação, estão relacionadas com variações lentas de carga. As dinâmicas rápidas e intermediárias que surgem com os chaveamentos das variáveis de controle não estão sendo modeladas, em particular, não foram modeladas as dinâmicas correspondentes aos ajustes discretos dos *TAP's* de transformadores, aos ajustes discretos dos dispositivos *Shunt's* e aos ajustes das tensões de referência dos geradores.

Além disso, conforme mencionado, determinar as ações de controle resolvendo o problema avaliando o SEP em apenas um nível de carregamento $S(t_i)$ não garante que o sistema permaneça operando sem violações diante a um aumento ΔS na demanda do SEP e nem garante que as MET sejam, no mínimo, iguais a um valor mínimo de segurança $\Delta S_{MET_{minima}}$. Diante a isso, foi proposta a segunda estratégia deste trabalho.

A segunda estratégia consiste em formular o problema sempre avaliando o SEP em três níveis de carregamento $S_0, S_1 = S_0 + \Delta S$ e $S_2 = S_1 + \Delta S_{MET_{minima}}$. A segunda estratégia garante que o SEP permanecerá operando cumprindo todos os requisitos operacionais durante o intervalo de potência especificado e MET mínima igual ou superior ao valor mínimo de segurança especificado.

Formulando o problema desta forma, utilizando as duas estratégias mencionadas, especificando em sua formulação que todos os requisitos operacionais do SEP devem obrigatoriamente ser satisfeitos nos três níveis de carregamento S_0, S_1 e S_2 , exceto as restrições de tensão no terceiro nível de carregamento, qualquer função objetivo pode ser minimizada ou maximizada na resolução do problema, que a solução obtida irá garantir que

todos os requisitos operacionais estarão satisfeitos, inclusive as restrições de margem de estabilidade de tensão mínima de segurança.

Além disso, garantindo-se que as MET do SEP sejam, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado durante o intervalo S_0 a S_1 , o cálculo exato da MET do sistema torna-se desnecessário, pois quando o SEP estiver no nível de carregamento S_1 novas ações de controle serão determinadas, as quais garantirão novamente que as restrições de MET mínima de segurança permanecerão satisfeitas.

Conforme mencionado, o problema será resolvido através de métodos de otimização e é natural especificar um ou mais objetivos para serem minimizados em sua resolução. Neste trabalho, foram propostos dois objetivos, independentes, para serem minimizados ou maximizados na resolução do problema. O primeiro objetivo proposto consiste na redução das perdas nas linhas de transmissão e o segundo objetivo consiste na maximização da margem de carregamento do SEP.

Para o planejamento que minimiza as perdas nas linhas de transmissão, a partir da discretização dos intervalos de potência ($S(t_0), S(t_1), \dots, S(t_n)$) e da estratégia de avaliação do SEP em três níveis de carregamento (S_0, S_1 e S_2), foi proposta a primeira formulação para o problema que determina as ações de controle do SEP.

A resolução deste primeiro problema determina as ações de controle, impostas em um dado nível de carregamento inicial $S_0(t_i)$, que minimizam as perdas nas linhas de transmissão, mantêm as variáveis e as grandezas do sistema dentro da região factível de operação, satisfazendo as restrições operacionais e demanda até o próximo nível de carregamento $S_1(t_{i+1})$, assegurando, em S_2 , que as MET sejam, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado em relação as potências especificadas no nível de carregamento S_1 , satisfazendo, simultaneamente, para o caso base e as contingências, todas as restrições operacionais, de demanda e de segurança até o próximo nível de carregamento. Neste problema, o operador do sistema estabelece os intervalos de potência do SEP e resolve o problema determinando as ações de controle que minimizam as perdas para cada intervalo de carregamento.

Alternativa a primeira formulação, visando à minimização das alterações nas ações de controle, considerando a estratégia de avaliação do SEP em três níveis de carregamentos (S_0, S_1 e S_2), foi proposta uma segunda formulação para o problema de determinação das

ações de controle do SEP. Especificadas as potências S_0 nas barras do SEP, o objetivo nesta formulação é determinar as ações de controle que mantêm as restrições operacionais, de demanda e de segurança satisfeitas, simultaneamente, para o caso base e as contingências, durante o maior incremento na demanda do SEP. Nessa formulação, o número de vezes que as ações de controle são modificadas é indiretamente minimizado, pois as ações de controle determinadas na resolução do problema mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos durante o maior incremento de carga possível.

A resolução deste segundo problema determina as ações de controle, impostas em um dado nível de carregamento $S_0(t_i)$, que mantêm as variáveis e as grandezas do sistema dentro da região factível de operação, satisfazendo as restrições operacionais e demanda até as potências especificadas $S_1 = S_0 + \Delta S$, assegurando, em $S_2 = S_1 + \Delta S_{MET_{mínima}}$, que as MET sejam, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado em relação às potências especificadas em S_1 , satisfazendo, simultaneamente, para o caso base e as contingências, todas as restrições operacionais, de demanda e de segurança, onde os valores de ΔS e $\Delta S_{MET_{mínima}}$ são determinados na resolução do problema simultaneamente com as ações de controle.

Resolvendo os problemas propostos repetidas vezes, realiza-se o planejamento da operação, obtendo-se uma sequência de ações de controle, indicando o momento ideal para realizar as mudanças nas ações de controle do SEP. A figura 1.1 esquematiza o planejamento proposto para minimizar as perdas nas linhas de transmissão, onde o operador do sistema estabelece os intervalos de tempo, associa para cada instante de tempo o respectivo nível de carregamento e otimiza o sistema determinando, para cada intervalo de potência, as ações de controle que minimizam as perdas, satisfazem os requisitos operacionais do SEP e atendem ao critério de mínima margem de estabilidade de tensão.

Figura 1.1: Esquematização para o planejamento da operação que minimiza as perdas nas linhas de transmissão.

A figura 1.2 esquematiza o planejamento proposto para maximizar a margem de carregamento do sistema, onde o operador do sistema estabelece o nível de carregamento inicial do sistema, otimiza o sistema determinando, para cada nível inicial de carregamento, as ações de controle que maximizam a margem de carregamento e satisfazem os requisitos operacionais do SEP. Neste caso, o problema de otimização que maximiza a margem de carregamento é inicialmente resolvido com as potências do sistema no nível de carregamento $S_0(1)$, obtendo-se na resolução do problema as ações de controle e o valor máximo de carregamento $S_1(1) = S_0(2)$ em que é possível manter os requisitos do sistema satisfeitos. O problema é resolvido novamente em $S_0(2)$, obtendo novas ações de controle e máximo valor de carregamento $S_1(2) = S_0(3)$ e assim sucessivamente até que todo o período seja analisado. À medida que as ações de controle determinadas mantêm os requisitos operacionais do sistema satisfeitos por mais tempo, ou seja, para o maior incremento de carga possível, o número de vezes que alterações nas ações de controle são necessárias, ao longo do período analisado, é menor em comparação com a primeira estratégia de planejamento, a qual fixa os níveis de carregamento para reavaliação dos controles. Neste último caso, para cada intervalo de potência, muito provavelmente, novas ações de controle serão determinadas, tanto para satisfazer o objetivo de minimizar as perdas quanto para manter os requisitos operacionais satisfeitos.

Figura 1.2: Esquematização para o planejamento da operação que maximiza a margem de carregamento do SEP.

Contudo, devido ao constante aumento na demanda do SEP ao longo do dia, pode ser que, em determinado momento, não existam ações de controle que possam ser impostas ao SEP de modo a satisfazer, simultaneamente, os requisitos operacionais do sistema para o caso base e todas as contingências. Quando o SEP encontra-se nesta situação existem duas alternativas para continuar com o planejamento da operação do sistema, a primeira alternativa é realizar o corte de carga em determinadas barras do SEP, gerando prejuízos econômicos, tanto para a fornecedora de energia elétrica, quanto para a consumidora. Alternativa ao corte de carga é minimizar o risco operacional do SEP, satisfazendo os requisitos operacionais para o caso base e o maior número possível de contingências e fornecer medidas de controle emergenciais para as contingências críticas do sistema.

Neste trabalho, optou-se em continuar o planejamento da operação minimizando o risco operacional do sistema. Diante a este fato, foi proposta uma metodologia para a identificação das contingências críticas do sistema, a qual será realizada em duas etapas.

A primeira etapa consiste em resolver um terceiro problema de otimização. Na resolução deste problema, determina-se qual o maior valor de carregamento em que é possível manter as restrições operacionais, de demanda e de segurança, simultaneamente, satisfeitas para o caso base e a lista de contingências.

A segunda etapa utiliza o resultado encontrado na primeira etapa e identifica a contingência crítica. Neste trabalho, foram propostos dois modos para identificar a contingência crítica do sistema. O primeiro modo consiste em analisar os valores das variáveis de folga do problema otimizado na primeira etapa. O segundo modo consiste em, com as ações de controles determinadas no problema otimizado da primeira etapa, realizar o fluxo de carga continuado e verificar qual contingência encontra-se no limiar de violar alguma restrição operacional, de demanda ou de segurança. Através dos valores das variáveis de folga e/ou do resultado do fluxo de carga continuado, obtém-se uma indicação da contingência crítica do SEP.

Em resumo, neste trabalho, foi proposta uma ferramenta para realizar o planejamento da operação do SEP. Foram propostos dois planejamentos para a operação do SEP, o primeiro planejamento busca minimizar as perdas nas linhas de transmissão e o segundo planejamento busca minimizar as alterações nas ações de controle do sistema. Para os dois planejamentos propostos têm-se a garantia que os requisitos operacionais do sistema serão sempre satisfeitos, inclusive as restrições de MET mínima de segurança, para o caso base e a lista de contingências. A seção 1.1 sumariza as principais contribuições deste trabalho.

1.1. Contribuições do Trabalho

A primeira contribuição deste trabalho foi a de fornecer duas formulações, para o problema que determina as ações de controle de um SEP, as quais garantem, em regime permanente e, obviamente, se o problema apresentar solução, que todos os requisitos operacionais do sistema serão satisfeitos, inclusive as restrições de MET mínima de segurança, para o caso base e a lista de contingências, onde:

i – A primeira formulação é capaz de determinar as ações de controle de um SEP que minimizam as perdas nas linhas de transmissão e mantêm todos os requisitos operacionais satisfeitos, principalmente o requisito relacionado à margem de estabilidade de tensão mínima de segurança, simultaneamente, para o caso base e uma lista de contingências, durante um acréscimo de carga especificado.

ii – A segunda formulação é capaz de determinar as ações de controle de um SEP que maximizam a margem de carregamento do sistema e mantêm todos os requisitos operacionais satisfeitos, principalmente o requisito relacionado à margem de estabilidade de tensão mínima

de segurança, simultaneamente, para o caso base e uma lista de contingências, durante o maior acréscimo de carga determinado na resolução do problema.

A segunda contribuição foi a de fornecer uma metodologia capaz de identificar as contingências críticas do SEP e os valores de carregamento em que elas se tornam críticas.

A partir destas contribuições, foram propostas três abordagens para realizar o planejamento da operação do SEP, onde:

A primeira abordagem foi a de realizar o planejamento da operação do SEP, ao longo do dia, determinando a sequência de ações de controle que devem ser realizadas para manter os requisitos operacionais do sistema satisfeitos e minimizar as perdas nas linhas de transmissão, enquanto existirem ações de controle que satisfaçam os requisitos operacionais, principalmente o requisito relacionado à margem de estabilidade de tensão mínima de segurança, simultaneamente, para o caso base e a lista de contingências.

A segunda abordagem foi a de realizar o planejamento da operação do SEP, ao longo do dia, determinando a sequência de ações de controle que devem ser realizadas para minimizar as perdas nas linhas de transmissão e manter os requisitos operacionais do sistema satisfeitos para o caso base e o maior número de contingências possível, minimizando-se, assim, o risco operacional do SEP.

A terceira abordagem foi a de realizar o planejamento da operação do SEP, ao longo do dia, determinando a sequência de ações de controle que devem ser realizadas para maximizar a margem de carregamento do sistema e manter os requisitos operacionais do sistema satisfeitos, principalmente o requisito relacionado à margem de estabilidade de tensão mínima de segurança, simultaneamente, para o caso base e a lista de contingências.

A seção 1.2 descreve como o trabalho foi organizado.

1.2. Organização do Trabalho

O trabalho foi organizado como mostrado a seguir.

O Capítulo 2 apresenta os requisitos operacionais que devem ser satisfeitos durante a operação do SEP, mostra como as curvas PV 's podem ser construídas e a MET calculada. Este capítulo também ilustra como as contingências e as ações de controle influenciam nos níveis das tensões, na MET, nos valores das perdas de energia elétrica nas linhas de

transmissão e nas potências reativas geradas. Além de classificar os estados operativos do SEP e as ações de controle. Nas considerações finais deste capítulo é ilustrada a complexidade do problema de determinação das ações de controle para o planejamento da operação do SEP.

O Capítulo 3 apresenta a proposta dessa dissertação de mestrado para o planejamento da operação do SEP. No início do capítulo foram apresentadas algumas curvas de carga horária do SEP brasileiro e, em seguida, foram feitas algumas observações sobre a discretização do período de análise em intervalos de tempo e de potência. Este capítulo também apresenta algumas formulações intermediárias para determinar as ações de controle, as quais não garantem que todos os requisitos operacionais do SEP sejam satisfeitos. Ao final do capítulo, são apresentadas as formulações finais, as estratégias e as metodologias para o planejamento da operação do SEP.

O capítulo 4 apresenta os resultados para os planejamentos da operação propostos no capítulo 3.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais, as conclusões e a proposta de continuidade deste trabalho.

CAPÍTULO 2

2. PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE UM SEP

2.1. Introdução

A interligação dos SEP tornou, por um lado, a operação do sistema mais segura e econômica, permitindo que a energia elétrica seja transmitida de um lado para outro onde esta se encontra deficiente. Por outro lado, devido à interligação do SEP, problemas locais podem se propagar por áreas maiores podendo atingir todo o SEP e resultar em blecautes.

Problemas relacionados à estabilidade e transferência de potência em SEP normalmente eram limitados à estabilidade angular e capacidade térmica dos elementos do sistema e muitos blecautes ocorriam devido a problemas envolvendo estabilidade transitória. Contudo, estes problemas vêm diminuindo graças à rapidez de atuação dos dispositivos de proteção e controle (Taylor, 1994).

Atualmente, alguns fatores, tais como: questões ambientais, aumento na demanda por energia elétrica, áreas de grande consumo concentradas e distantes das unidades geradoras, desregulamentação do mercado de energia elétrica, fazem com que grande atenção dos operadores do sistema esteja voltada ao problema de instabilidade de tensão, que é a causa de recentes blecautes ocorridos no mundo.

Durante a operação do SEP, as cargas do sistema devem ser atendidas de acordo com a tensão e frequência contratadas e sem interrupções no fornecimento de energia elétrica e, por questão de segurança operacional dos elementos do sistema, o operador do SEP deve garantir que não existam equipamentos sobrecarregados no sistema.

O SEP está sujeito a alterações topológicas (contingências) e, para essas condições, as cargas devem continuar sendo atendidas seguindo os requisitos de qualidade (tensão e frequência) e de segurança operacional dos elementos do sistema. Além das modificações topológicas, o SEP está sujeito à variação de carga ao longo do dia, sendo assim, o operador do sistema deve planejar a operação do SEP para evitar possíveis violações nas restrições de qualidade e sobrecarregamento dos elementos do sistema mediante a variação da demanda. Além disso, o operador do SEP deve garantir MET mínima de segurança, para o caso base e todas as contingências, para evitar a instabilidade de tensão e, consequentemente, a

interrupção no fornecimento de energia elétrica, possíveis violações nas restrições de qualidade e sobrecarregamento nos equipamentos do sistema.

Atendendo todos os requisitos mencionados, garante-se uma operação segura, de qualidade, confiável e robusta. A seção 2.2 apresenta os requisitos que devem ser satisfeitos durante a operação do SEP.

2.2. Requisitos operacionais para a operação de um SEP

Conforme mencionado, alguns requisitos devem ser satisfeitos para se considerar a operação do SEP confiável, de qualidade, robusta e segura. Esta seção tem por objetivo descrever tais requisitos.

Cada país possui um órgão responsável por definir, supervisionar e caracterizar os requisitos operacionais do SEP que devem ser satisfeitos para se considerar a operação do sistema segura, robusta, confiável e de qualidade.

No Brasil, por exemplo, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável por definir e caracterizar esses requisitos do SEP. Conforme as diretrizes e critérios para estudos elétricos (Ons, 2011), os estudos de fluxo de potência devem abranger, além da condição operativa corrente, análises de contingências de linhas, transformadores e outros elementos do sistema elétrico, de forma a garantir que o SIN (Sistema Interligado Nacional) opere sem violações inadmissíveis nos limites de tensão e de carregamento dos elementos do SEP, onde o valor da margem de estabilidade de tensão deve permanecer igual ou superior a 4% para análises em tempo real. A tabela 2.1 mostra a faixa de valores que as tensões podem variar segundo o ONS, em situações em que haja o esgotamento dos recursos de controle, os níveis de tensão podem situar-se fora das faixas estabelecidas apresentadas nesta tabela. Contudo, especial atenção deve ser dada para os limites superiores de tensão, devido a danos nos equipamentos.

Tabela 2.1: Limites de Tensão aceitáveis para operação do sistema (Ons, 2011).

Tensão nominal de operação	Condição operativa Normal	Condição operativa de Emergência
(kV)	(pu)	(pu)
<230	0,95 a 1,05	0,90 a 1,05
230	0,95 a 1,05	0,90 a 1,05
345	0,95 a 1,05	0,90 a 1,05
440	0,95 a 1,046	0,90 a 1,046
500	1,00 a 1,10	0,95 a 1,10
525	0,95 a 1,05	0,90 a 1,05
765	0,90 a 1,046	0,90 a 1,046

Segundo (Ons, 2017), no Brasil, os SEP são planejados pelo critério de confiabilidade N-1, isto é, o SEP deve permanecer operando sem violações nas restrições operacionais e sem interromper o fornecimento de energia elétrica aos consumidores, mesmo na ocorrência de uma contingência simples. Para alguns casos, adotam-se alguns critérios mais restritivos, envolvendo a perda de dois ou mais elementos.

Em (Canizares, 2002), encontram-se diversos conceitos teóricos e práticos associados ao fenômeno de estabilidade de tensão, produzida por vários pesquisadores da área durante muitos anos, onde foram reunidos diversos trabalhos publicados. Em (Abed, 1998) são relatados alguns critérios para avaliação do SEP diante do problema de instabilidade de tensão, onde são definidas as margens de estabilidade de tensão mínimas permitidas considerando-se a perda de diversos elementos do SEP, conforme pode ser verificado na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Margem de Carregamento (Abed, 1998).

Nível de desempenho	Distúrbio	Margem (MW)	Margem (MVAR)
		Método Curva PV	Método Curva VQ
A	Qualquer elemento do sistema, tais como: Gerador, Linha e Transformador	$\geq 5\%$	$\geq 5\%$ (Pior Caso)
B	Barramento	$\geq 2,5\%$	50% da margem do nível A
C	Qualquer combinação de dois elementos, tais como: Uma linha e um gerador dois geradores Duas linhas	$\geq 2,5\%$	50% da margem do nível A
D	Qualquer combinação de três elementos, tais como: Três linhas Uma subestação	> 0	> 0

Conforme pode ser observado em (Abed, 1998) e (Ons, 2017), o SEP deve ser estruturado para que as MET sejam, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado para a condição topológica corrente e para as contingências do SEP.

Na tabela 2.2, podemos notar a utilização do método das curvas PV para mensurar a MET do SEP. As curvas PV são amplamente utilizadas na área de SEP, a curva PV é uma forma de visualizar o comportamento das variáveis e das grandezas do SEP em relação ao crescimento de carga no sistema, sendo assim, a seção seguinte descreve como as curvas *PV*'s podem ser construídas.

2.3. Curvas PV e QV

Os valores das variáveis e das grandezas do SEP em relação ao aumento no carregamento do sistema podem ser determinados resolvendo-se um fluxo de carga para cada valor de carregamento e pode ser visualizado construindo-se o gráfico, com os valores determinados, em relação ao carregamento do SEP (curvas PV e QV). Construindo as curvas

PV e QV torna-se fácil a visualização do comportamento das tensões nas barras do sistema e das potências reativas geradas em relação ao aumento da demanda do SEP.

Conforme mencionado, o fluxo de carga convencional pode ser utilizado para obter os pontos de operação do SEP em relação ao crescimento de carga e assim construir as curvas PV e QV, porém, nas proximidades do PMC, o fluxo de carga convencional diverge devido à singularidade da matriz Jacobiana, não sendo possível determinar com exatidão o PMC do SEP. A fim de evitar a singularidade da matriz jacobiana no PMC foi proposto o método do fluxo de carga continuado, onde o parâmetro de continuação é alterado e possibilita o traçado completo das curvas PV e QV, bem como mensurar com exatidão o PMC e a MET do SEP. Para realizar o traçado das curvas $PV's$ e o planejamento da operação do SEP, é necessário conhecer como a demanda do sistema varia ao longo do dia.

Nesta dissertação, sem perda de generalidade, foi adotado que as potências ativas e reativas das barras de carga e as potências ativas das barras PV aumentam linearmente e proporcionalmente em relação às suas potências iniciais. Para isto, as potências ativas e reativas das barras de carga e as potências ativas das barras PV do SEP foram parametrizadas em função de suas potências ativas e reativas iniciais das barras de carga e potências ativas iniciais nas barras PV através da variável λ (2.1 - 2.2).

$$S^k = \lambda * (P_0^k + j Q_0^k) \quad \forall k \in \Omega_{PQ} \quad (2.1)$$

$$S^k = \lambda * P_0^k \quad \forall k \in \Omega_{PV} \quad (2.2)$$

onde, P_0^k e Q_0^k são os valores iniciais das potências ativas e reativas, respectivamente, da barra k e $\lambda = 1$ representa o SEP no nível de carregamento atual. Definido o comportamento das potências ao longo do dia, a seção 2.4 exemplifica e caracteriza como a MET do SEP é calculada.

2.4. Margem de estabilidade de tensão

Conforme mencionado na seção 2.2, o operador do SEP deve assegurar que as MET sejam, no mínimo, iguais a um valor mínimo de segurança especificado. A MET mede a proximidade do SEP ao colapso de tensão. Por definição, MET é a distância entre o carregamento atual e o ponto de máximo carregamento (PMC) do sistema.

Por exemplo, considere o SEP de duas barras da figura 2.1, onde $V_g = 1,05 pu$, $X = 0,125 pu$, $P_2 = 0,5 pu$ e $Q_2 = 0,125 pu$. A figura 2.2 mostra a curva PV desse sistema,

onde S_1 é o nível de carregamento atual do sistema e S_2 é o nível de carregamento no PMC. A figura 2.2, também ilustra a região de operação estável e instável do SEP, além de mostrar o comportamento característico da tensão em relação ao aumento na demanda do sistema, a qual decai quando o nível de carregamento do sistema aumenta.

Figura 2.1: Sistema de duas barras.

Figura 2.2: Margem de Estabilidade de tensão

Segundo a definição, MET é a distância em unidades de potência, MVA ou percentual, entre o nível de carregamento atual S_1 até o PMC do sistema (S_2). Normalmente, a MET é indicada através do valor percentual (2.3). Para o exemplo de duas barras apresentado, o valor da MET é dado por (2.4).

$$MET = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1 \right) * 100 \% \quad (2.3)$$

$$MET = \left(\frac{3.44}{1} - 1 \right) * 100 \% = 240\% \quad (2.4)$$

Conforme mencionado, para garantir que a operação do SEP não esteja vulnerável ao colapso de tensão, é necessário garantir que as MET de todas as contingências sejam maiores que o valor mínimo de segurança. Em face ao exposto, a subseção 2.4.1 mostra a influência das contingências nos níveis de tensão e nas MET do SEP.

2.4.1. Influência das contingências nos níveis de tensão e na MET do SEP

Conforme mencionado, segundo o ONS, o SEP deve continuar operando sem violações inadmissíveis nos limites de tensão, no carregamento dos elementos do SEP e a MET deve permanecer igual ou superior a 4% para cada contingência seguindo o critério N-1.

Considere o sistema de duas barras (figura 2.3), onde $V_g = 1,05 \text{ pu}$, $P_2 = 0,5 \text{ pu}$ e $Q_2 = 0,125 \text{ pu}$ e $X = 0,25 \text{ pu}$ o valor da impedância de cada linha.

Figura 2.3: Sistema de duas barras, variação do número de linhas.

A figura 2.4 apresenta as duas curvas PV, relacionadas ao caso base e a contingência em uma das linhas de transmissão, e mostra a variação do PMC e das tensões em relação ao número de linhas que ligam a barra 1 à barra 2.

Figura 2.4: Família de curvas PV's para diferentes números de linhas.

Podemos observar que a perda de uma linha de transmissão reduz o PMC do SEP e, consequentemente, a MET. Isto ocorre devido à redução na capacidade de transferência de potência do SEP. Analogamente, podemos estender o raciocínio para a perda de transformadores. As perdas de geradores e dispositivos compensadores de potência reativa também reduzem o PMC do SEP, devido à redução na capacidade de fornecimento de potência aos elementos do SEP. No caso de perda de algum elemento do SEP, o sistema pode recair sobre dois cenários (figura 2.5).

Figura 2.5: À direita cenário pós-falta estável e à esquerda cenário pós-falta instável

No primeiro cenário, o SEP encontra-se no ponto de operação O_1 , a distância entre o nível de carregamento atual e o PMC fornece o valor da MET (2.5) do sistema intacto (sem contingências). Após a ocorrência da contingência, com a perda de um elemento, o sistema é conduzido para um novo ponto de operação O_2 . Embora possa ocorrer alguma violação nas restrições operacionais do sistema, o sistema recai sobre um ponto de operação factível e ainda é possível manter o balanço de potência do sistema, isto é, o sistema na condição pós-falta também apresenta MET maior que zero (2.6).

$$MET_{caso_base} = \left(\frac{3,44}{1} - 1 \right) * 100 \% = 240\% \quad (2.5)$$

$$MET_{contingência} = \left(\frac{1,721}{1} - 1 \right) * 100 \% = 72\% \quad (2.6)$$

No segundo cenário, o SEP encontra-se no ponto de operação O_3 , novamente, a distância entre o nível de carregamento atual e o PMC fornece o valor da MET (2.7) do sistema intacto. Após a ocorrência da contingência, com a perda de um elemento, o sistema é incapaz de manter o balanço de potência satisfeito, isto é, o sistema na condição pós-falta

apresenta MET negativa (2.8) e, dada a severidade da contingência, ocorre o fenômeno de instabilidade de tensão. Diante a isso, é primordial garantir que exista MET para o caso base e as contingências do SEP.

$$MET_{caso_base} = \left(\frac{3,44}{2,393} - 1 \right) * 100 \% = 43\% \quad (2.7)$$

$$MET_{contingência} = \left(\frac{1,721}{2,393} - 1 \right) * 100 \% = -28\% \quad (2.8)$$

Em resumo, para considerar a operação do SEP segura, de qualidade, confiável e robusta, os seguintes requisitos operacionais devem ser satisfeitos:

- i. Todas as cargas devem ser atendidas (restrições de demanda);
- ii. A frequência elétrica do SEP deve permanecer próxima ao valor nominal (restrição operacional);
- iii. As magnitudes das tensões nas barras devem estar dentro dos limites especificados de operação (restrição operacional);
- iv. Não devem existir componentes do SEP sobrecarregados (transformadores, geradores, linhas de transmissão, etc.) (restrição operacional);
- v. A margem de estabilidade de tensão deve ser igual ou superior ao valor mínimo de segurança especificado (restrição de segurança).
- vi. As condições de *i* a *v* devem ser satisfeitas para todas as contingências do SEP.

Definidos e caracterizados os requisitos operacionais do SEP, a seção seguinte caracteriza os estados operativos do sistema de acordo com os valores dos estados e das grandezas do SEP.

2.5. Estados operativos do SEP

Na seção 2.2, foram vistos alguns critérios, definidos pelos órgãos responsáveis pela operação do SEP, relativos aos níveis de tensão e as MET do sistema que devem ser satisfeitos durante a operação do SEP. Na seção 2.4 foi visto como as MET são calculadas, como as perdas de elementos do sistema influenciam no PMC e a importância de manter as MET, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado pelo operador do sistema. Sendo assim, podemos definir os estados de operação do SEP da seguinte maneira (Meliopoulos, [2006?]):

Estado de operação normal seguro: o SEP encontra-se no estado normal seguro quando todas as restrições operacionais, de demanda e de segurança são satisfeitas para a condição topológica atual e para todas as contingências.

Estado de operação normal vulnerável ou inseguro: o SEP encontra-se no estado normal vulnerável quando todas as restrições operacionais, de demanda e de segurança são satisfeitas para a condição topológica atual, porém uma ou mais restrições operacionais encontram-se violadas para uma ou mais contingências.

Estado de emergência: o SEP encontra-se no estado de emergência quando uma ou mais restrições de operação estão violadas na condição topológica atual, porém todas as restrições de demanda e de segurança encontram-se satisfeitas. O caso base, normalmente, representa o melhor estado do SEP, isto é, uma vez que alguma restrição operacional foi violada no caso base, muito provavelmente, as contingências apresentam violações operacionais, ou violações que são consideradas piores, tais como a violação nas restrições de demanda e/ou de segurança.

Estado restaurativo: o SEP encontra-se no estado restaurativo quando uma ou mais restrições de demanda estão violadas na condição topológica atual, porém todas as restrições de operação encontram-se dentro dos limites. O SEP encontra-se neste estado quando, ou por meio da atuação dos dispositivos de proteção, ou através da intervenção do operador do sistema, algumas cargas no sistema deixaram de ser atendidas.

Estado extremo: o SEP encontra-se no estado extremo quando uma ou mais restrições de operação e uma ou mais restrições de demanda não são satisfeitas na condição topológica atual. Devido ao constante aumento na demanda do sistema, ao longo do dia, ou devido a alguma limitação física de algum dos elementos do SEP, pode ocorrer a violação tanto nas restrições operacionais quanto nas restrições de demanda e de segurança, quando isto ocorre o SEP encontra-se no estado extremo.

Definidos os estados em que o SEP pode estar operando e de acordo com os tipos de restrições violadas, o operador do sistema deve adotar medidas de controle, a fim de manter o SEP no estado normal seguro ou restabelecer o sistema e conduzi-lo ao estado normal seguro. Diante ao exposto, a seção seguinte ilustra as principais medidas de controle que podem ser utilizadas e como estas medidas influenciam nas tensões e nas margens de carregamento do SEP. Também foram ilustradas como estas medidas de controle influenciam nos valores das

perdas de energia elétrica nas linhas de transmissão e na geração de potência reativa dos geradores do SEP.

2.5.1. Influência das ações de controle na margem de carregamento, nos níveis de tensão, nas perdas do SEP e nas potências reativas geradas

Vimos na seção anterior que o SEP pode ou não estar operando cumprindo todos os requisitos operacionais do sistema.

Utilizando as curvas PV e QV, esta subseção tem por objetivo ilustrar como as tensões e o PMC, e consequentemente a MET, são influenciados em relação às mudanças nas ações de controle do SEP, tais como: ajuste das tensões de referência dos geradores, dos dispositivos compensadores de potência reativa e dos *Tap's* dos transformadores.

Na operação do SEP, o operador do sistema pode determinar ações que mantêm o SEP no estado normal seguro e, ainda, reduzam os custos. As perdas nas linhas de transmissão influenciam diretamente nos custos da operação do SEP, sendo desejável minimizá-las sempre quando for possível. Também é desejável, na operação do SEP, manter os níveis de geração de potência reativa de cada gerador do sistema dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante, pois quando os geradores atingem os limites, mínimos ou máximos, perdem a capacidade de manter sua tensão terminal e podem provocar a instabilidade de tensão no SEP. Diante a isso, também foram ilustrados os valores das perdas nas linhas de transmissão e a geração de potência reativa no SEP em relação às mudanças nas ações de controle do SEP.

Novamente, é considerado, nos seguintes casos, um crescimento de carga linear e proporcional às potências iniciais da barra de carga e de geração. O crescimento de carga é dado pelo fator multiplicativo λ , onde $\lambda = 1$ representa a condição inicial das potências do SEP. Considere, para todos os exemplos, o SEP de três barras apresentado na figura 2.6, onde $P_2 = 0,5 \text{ pu}$ e $Q_2 = 0,125 \text{ pu}$ são os valores iniciais para as potências ativa e reativa, $X_{12} = 0,25 \text{ pu}$ é o valor da indutância do transformador que liga a barra 1 a barra 2 e $Z_{23} = 0,02 + j 0,2$ é o valor da impedância de cada linha de transmissão que liga a barra 2 a barra 3.

Figura 2.6: Sistema de três barras

2.5.1.1. Influência da posição dos *Tap*'s dos transformadores.

Considere o sistema de três barras (figura 2.6), $V_g = 1,10 \text{ pu}$ e $B_{SH} = 0 \text{ pu}$. A figura 2.7 apresenta a família de curvas PV e ilustra a variação do PMC e das tensões em relação ao valor do *Tap* do transformador que conecta a barra 1 à barra 2, onde as linhas tracejadas em vermelho correspondem aos limites de tensão admissíveis na barra de carga. A figura 2.8 mostra os valores das perdas nas linhas de transmissão e o comportamento da potência reativa gerada mediante ao aumento na demanda para os mesmos valores de *Tap* ilustrados na figura 2.7.

Figura 2.7: Família de curvas PV's para diferentes valores de *TAP* do transformador.

Figura 2.8: Comportamento da potência reativa gerada e valores para as perdas nas linhas de transmissão para diferentes valores de TAP do transformador.

Nas figuras 2.7-2.8, podemos observar que os *TAP's* dos transformadores podem ser ajustados para elevar as tensões em determinadas barras do sistema, de forma a mantê-las dentro dos limites máximos e mínimos especificados, aumentar a MET, reduzir a potência gerada nos geradores e reduzir as perdas nas linhas de transmissão do SEP. Podemos observar também que, a influência na mudança dos *TAP's* torna-se mais evidente quando o SEP encontra-se mais carregado. Além disso, podemos notar também que existe um momento ideal para o chaveamento destes dispositivos para que os limites de tensão não sejam violados.

2.5.1.2. Influência da compensação reativa nos níveis de tensão e no PMC.

Considere o sistema de duas barras (figura 2.6), $V_g = 1,10 \text{ pu}$ e $tap_{12} = 1$. A figura 2.9 mostra o comportamento da tensão, na barra de carga, e do PMC em relação ao valor do elemento *Shunt*, onde o elemento *Shunt* com valor de compensação reativa positiva é do tipo capacitivo e indutivo caso contrário e as linhas tracejadas em vermelho correspondem aos limites de tensão admissíveis na barra de carga.

Figura 2.9: Família de curvas PV's para diferentes valores do elemento *Shunt*

Muitas vezes, os grandes centros consumidores de energia elétrica encontram-se distantes das grandes matrizes energéticas. A dificuldade em transferir grandes quantidades de potência reativa através das linhas de transmissão, ou por longas linhas de transmissão, mantendo os níveis de tensão do SEP dentro dos limites especificados, requer que parte da potência reativa seja compensada localmente quando existir disponibilidade de dispositivos mais próximos à carga. Conforme pode ser observado na figura 2.9, a compensação capacitiva aumenta os níveis de tensão e a margem de carregamento do SEP e, diante ao constante aumento do carregamento, ao longo dia, a compensação reativa pode ser modificada para trazer as tensões do sistema para níveis aceitáveis e aumentar a MET do SEP. Podemos observar, novamente, que existe um momento ideal para o chaveamento destes dispositivos para que não ocorram violações nos limites de tensão nas barras do SEP. A figura 2.10 mostra a potência reativa gerada e as perdas nas linhas de transmissão para os mesmos chaveamentos e valores de carregamento utilizados anteriormente.

Figura 2.10: Comportamento da potência reativa gerada e valores para as perdas nas linhas de transmissão para diferentes valores do elemento *Shunt*.

Podemos observar na figura 2.10 que o chaveamento do dispositivo *Shunt* e, consequentemente, a compensação reativa, reduz a potência reativa que deve ser gerada pelo gerador, devido à potência reativa suprida localmente pelo banco de capacitores e que as perdas nas linhas de transmissão são menores quanto maior for a compensação reativa, pois reduzem o fluxo de potência reativa e a diferença de tensão entre as barras.

2.5.1.3. Influência da tensão de referência dos geradores nos níveis de tensão e no PMC.

Considere o sistema de duas barras (figura 2.6), $B_{SH} = 0 \text{ pu}$ e $tap_{12} = 1$. A figura 2.11 mostra o comportamento da tensão, na barra de carga, e do PMC em relação ao valor da tensão de referência do gerador conectado a barra 1, onde as linhas tracejadas em vermelho correspondem aos limites de tensão admissíveis na barra de carga.

Figura 2.11: Família de curvas PV's, da barra de carga, para diferentes valores de tensão do gerador conectado a barra de geração.

Podemos notar na figura 2.11 que a tensão de referência do gerador pode ser modificada tanto para aumentar os níveis de tensão em barras adjacentes, quanto para aumentar a MET do SEP. Este tipo de controle é denominado controle secundário de tensão (CST) e o objetivo de realizar o controle secundário de tensão é manter os níveis de tensão em determinadas barras piloto do SEP em um determinado valor especificado. Novamente, podemos notar que existe um momento ideal para alterar as tensões de referência dos geradores para manter as tensões em barras adjacentes dentro dos níveis aceitáveis. A figura 2.12 ilustra a influência da tensão de referência na geração de potência reativa e nas perdas de potência ativa nas linhas de transmissão do SEP, as quais se tornam mais significativas quando o SEP encontra-se em condições de alto carregamento.

Figura 2.12: Comportamento da potência reativa gerada e valores das perdas nas linhas transmissão para diferentes valores de tensão do gerador conectado a barra de geração.

Vimos, através dos exemplos apresentados, como as ações de controle influenciam nas tensões, nas MET, na potência reativa gerada e nas perdas de energia elétrica nas linhas de transmissão, sendo assim, estas medidas de controle podem ser realizadas para manter ou conduzir o SEP ao estado normal seguro. A seção 2.5.2 classifica as ações de controle segundo o estado de operação em que o sistema se encontra ao estado em que o mesmo é conduzido.

2.5.2. Classificação das ações de controle no planejamento e na operação do SEP.

No início da seção 2.5 foram caracterizados os estados operacionais do SEP segundo os requisitos operacionais satisfeitos e na seção 2.5.1 foram vistas algumas ações de controle que podem ser utilizadas para manter ou conduzir o sistema ao estado de operação normal seguro. De acordo ao estado de operação em que o SEP se encontra, podemos classificar as ações de controle mediante ao estado operacional ao qual o mesmo é conduzido. Sendo assim, os controles podem ser classificados como:

Controle de melhoria: são ações de controle tomadas pelo operador para melhorar alguns índices do sistema, tais como: melhorar o perfil de tensão, deixando-as mais próximas ao valor nominal, aumentar a MET, aumentar as reservas de reativos dos geradores,

minimizar as perdas nas linhas de transmissão, evitar sobrecarregamentos de elementos do SEP, entre outros.

Controle preventivo: são ações de controle adotadas pelo operador para conduzir o sistema do estado normal vulnerável para o estado normal seguro.

Controle corretivo: são ações de controle tomadas pelo operador para conduzir o sistema do estado emergencial para o estado normal inseguro.

Controle emergencial: são ações de controle tomadas pelo operador para conduzir o sistema do estado de emergência ou extremo para o estado restaurativo.

Controle restaurativo: são ações de controle que levam o sistema do estado restaurativo para o estado normal seguro/inseguro.

Uma vez caracterizados os estados de operação do SEP e classificados os tipos de ações de controle, a figura 2.13 resume os estados operativos do SEP, as transições entre estes estados e os tipos de controles que podem ser adotados, onde

- D_{cb} , O_{cb} e $MET_{cb}^{mínima}$ indicam que todas as restrições de demanda, operacionais e de segurança, respectivamente, são atendidas para o caso base,
- D_{nc} , O_{nc} e $MET_{nc}^{mínima}$ indicam que todas as restrições de demanda, operacionais e de segurança, respectivamente, são atendidas para todas as contingências,
- $\overline{D_{cb}}$, $\overline{O_{cb}}$ e $\overline{MET_{cb}^{mínima}}$ indicam que pelo menos uma das restrições de demanda, operacional e de segurança, respectivamente, não está sendo atendida para o caso base,
- $\overline{O_{nc}}$ indica que pelo menos uma das restrições operacional não está sendo atendida para uma ou mais contingências.

Figura 2.13: Estados de operação e transição entre estados para análise de segurança.

Podemos notar na figura 2.13 que, quando existe alguma violação de restrição no caso base, as restrições relacionadas às contingências nem são consideradas para caracterizar o estado operacional do SEP, pois se torna prioridade do operador do SEP restaurar o sistema para manter os requisitos operacionais satisfeitos para a condição topológica atual.

Neste trabalho, o problema de determinação das ações de controle, para o planejamento da operação do SEP, será formulado, de tal modo que, as ações de controle determinadas na resolução do problema manterá o SEP no estado normal seguro enquanto existirem ações de controle que mantenham todos os requisitos operacionais do sistema, simultaneamente, satisfeitos para o caso base e todas as contingências da lista de contingências. Quando não for mais possível determinar ações de controle para manter o SEP no estado normal seguro, utilizar-se-á a estratégia de manter o SEP o mais seguro possível, determinando ações de controle que satisfaçam os requisitos operacionais do sistema para a maioria das contingências, indicando para as contingências críticas, medidas de controle emergenciais para serem aplicadas se acaso a contingência crítica ocorrer.

2.6. Considerações Finais

Neste capítulo, foram caracterizados os requisitos operacionais que devem ser satisfeitos para garantir que as cargas do SEP sempre sejam atendidas cumprindo os requisitos de qualidade. Para garantir o fornecimento contínuo e de qualidade, foi visto que os mesmos requisitos de qualidade devem ser satisfeitos para casos de contingências e, também, a importância de assegurar MET mínima de segurança para que o colapso de tensão seja evitado. Também foram apresentadas, através de simples exemplos, as influências das ações de controle e das contingências nos níveis de tensão, na geração de potência reativa, nas perdas de potência ativa nas linhas de transmissão e nas margens de estabilidade de tensão do SEP e vimos que existe um momento ideal para realizar mudanças nas ações de controle para que os limites de tensão permaneçam dentro dos valores permitidos.

Devido a grande quantidade de contingências, de restrições e de ações de controle existentes em um SEP, salienta-se a importância do desenvolvimento de ferramentas para análise do SEP, de modo a auxiliar o operador do sistema na tomada de decisão.

A fim de evidenciar a complexidade do planejamento da operação do SEP, considere, novamente, o SEP de 3 barras da figura 2.6 e, por simplicidade, considere que a tensão de referência do gerador, o banco de capacitores e o transformador podem assumir somente os valores que foram ilustrados nos exemplos.

Seja N_C o número de combinações entre os valores dos dispositivos, sem uma ferramenta para auxiliar o operador do sistema, para este SEP existem $N_C = 5 * 4 * 4 = 80$ combinações entre os valores dos dispositivos de controle do sistema. Para cada combinação o operador do SEP deveria realizar um FCC e verificar os níveis de tensão e as MET e, dentre as combinações que mantêm os requisitos operacionais satisfeitos, escolher a combinação que melhor satisfaz um determinado objetivo operacional (por exemplo: minimizar perdas).

Considerando que o SEP deve permanecer na região factível de operação e apresentar MET mínima para cada contingência, o número de cenários (caso base e contingência) que deveriam ser analisados passa a ser $n_{\text{cenários}} = 2 * 80 = 160$, tornando a análise do SEP impraticável.

Diante aos fatos mencionados, neste trabalho, foi desenvolvida uma ferramenta, composta de estratégias, metodologias e formulações, para auxiliar o operador do sistema no planejamento da operação do SEP. Nesta ferramenta, o problema de determinação das ações de controle é resolvido, de modo a determinar uma sequência de ações de controle que

satisfazem os requisitos operacionais do SEP ao longo do dia, garantindo que as cargas sejam atendidas cumprindo os requisitos de qualidade e indicando o momento ideal para que estas as alterações, nas ações de controle, ocorram. Essas estratégias, metodologias e formulações são apresentadas no próximo capítulo.

CAPÍTULO 3

3. FORMULAÇÕES, MÉTODOS E ESTRATÉGIAS PARA REALIZAR O PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DE UM SEP

Neste capítulo serão apresentadas as formulações, os métodos e as estratégias propostas neste trabalho para realizar o planejamento da operação de um SEP. O planejamento da operação do SEP consiste em determinar as ações de controle que devem ser realizadas ao longo do dia, de forma que estas ações de controle sejam capazes de satisfazer a todos os requisitos da operação do sistema durante todo o dia, inclusive as restrições de MET mínima de segurança. Neste trabalho, seguimos a premissa de que o comportamento da demanda do SEP é conhecido ao longo de todo o período analisado, isto é, para todos instantes de tempo, ao longo do dia, sabe-se exatamente quais são os valores das potências ativas e reativas em cada barra do sistema. Caracterizado o comportamento da demanda do SEP, foram propostas duas abordagens para realizar o planejamento da operação do SEP. A primeira abordagem tem por objetivo minimizar as perdas nas linhas de transmissão do SEP e a segunda abordagem tem por objetivo maximizar a margem de carregamento do SEP.

Para realizar o planejamento que minimiza as perdas nas linhas de transmissão, como primeira estratégia, subdividiu-se o período de interesse da análise em intervalos de potência. A seção 3.2 apresenta alguns motivos e condições que devem ser considerados nessa primeira estratégia.

Como o crescimento de carga do SEP é conhecido, o operador do sistema conhece as potências em cada barra do SEP ao longo do dia. Vimos, nos capítulos anteriores, a variedade de requisitos operacionais que devem ser satisfeitos na operação do SEP, principalmente, os relacionados com a qualidade no fornecimento de energia elétrica e a segurança do sistema. Para assegurar que esses requisitos são sempre satisfeitos, foi proposta, neste trabalho, uma segunda estratégia, a qual consiste em formular o problema sempre avaliando o SEP em três níveis de carregamento consecutivos, desta forma garante-se que os requisitos operacionais, principalmente aqueles relativos às margens mínimas de carregamento, são sempre satisfeitos.

Considerando as duas estratégias mencionadas, foi proposta a primeira formulação para determinar as ações de controle do SEP. A primeira formulação consiste na avaliação do SEP em três níveis de carregamento $S_0(t_i)$, $S_1(t_{i+1})$ e $S_2(S_1)$. O valor S_0 é a demanda no

instante inicial do intervalo t_i , S_1 é a demanda no instante final do intervalo t_{i+1} e S_2 é o valor da demanda que garante margem de estabilidade de tensão mínima em todo o intervalo.

Na formulação proposta, determinam-se as ações de controle que minimizam as perdas nas linhas de transmissão para o nível de carregamento S_0 e garantem todos os requisitos operacionais satisfeitos, inclusive as restrições de MET mínima de segurança, de S_0 até o próximo nível de carregamento S_1 , simultaneamente para o caso base e para uma lista de contingências.

Para realizar o planejamento que maximiza a margem de carregamento do SEP, considerando a segunda estratégia, foi proposta uma segunda formulação. A segunda formulação também consiste na avaliação do SEP em três níveis de carregamento S_0 , S_1 e $S_2(S_1)$. Porém, nesta formulação, S_0 é a única potência especificada na formulação do problema, as potências S_1 e $S_2(S_1)$ são determinadas na resolução do problema simultaneamente com as ações de controle. O objetivo desta formulação é determinar as ações de controle que maximizam S_1 , mantendo os requisitos operacionais do SEP satisfeitos, inclusive as restrições de MET mínima de segurança, simultaneamente para o caso base e para a lista de contingências. Na medida em que se determinam as ações de controle que maximizam o valor de potência S_1 , mantêm-se os requisitos operacionais do sistema satisfeitos por mais tempo e, assim, procura-se minimizar de forma indireta o número de vezes que as ações de controle são alteradas ao longo do dia. Minimizando as modificações nas ações de controle, minimizam-se os desgastes nos equipamentos chaveados e os custos relacionados à manutenção destes dispositivos.

Além disso, devido ao constante aumento na demanda do SEP, ao longo do dia, pode ser que, em determinado momento, não seja mais possível encontrar ações de controle que atendam, simultaneamente para o caso base e para as contingências, os requisitos operacionais do SEP. Para tratar destes casos, foi proposta uma terceira estratégia, neste trabalho, a qual consiste em manter o SEP operando com o menor risco operacional, mantendo os requisitos operacionais satisfeitos para a maioria das contingências e determinando medidas de controle emergenciais para as contingências críticas do SEP.

Para facilitar o entendimento do leitor, as formulações propostas serão desenvolvidas neste capítulo de forma gradual. Primeiramente, formularemos o problema clássico de determinação das ações de controle que minimizam uma função objetivo qualquer avaliando o SEP em um único nível de carregamento S_0 e considerando apenas o caso base. Este é o

problema clássico de otimização aplicado a SEP encontrado na literatura, a subseção 3.3.5 apresentará as deficiências em se utilizar a formulação clássica para obter as ações de controle do SEP, onde não existe garantia que diversos requisitos operacionais do sistema são satisfeitos.

A seguir, formularemos o problema para determinar as ações de controle do SEP que minimizam uma função objetivo qualquer avaliando o SEP, novamente, em um único nível de carregamento S_0 , porém considerando o caso base e uma lista de contingências. Em seguida, formularemos o problema para determinar as ações de controle, avaliando o SEP em mais de um nível de carregamento, considerando o caso base e uma lista de contingências, até chegar à formulação final do problema de otimização, cujo objetivo é determinar as ações de controle que mantêm o SEP dentro da região factível de operação e garantam MET mínima igual ou superior ao valor especificado, considerando o caso base e uma lista de contingências.

Na seção 3.1, são apresentadas, brevemente, algumas informações, armazenadas nos bancos de dados, relativas às curvas de carga horária do SEP brasileiro e como essas informações podem auxiliar a previsão de carga em um SEP ao longo do dia. Na seção 3.2, são apresentadas as razões e os procedimentos para realizar a discretização da curva de carga horária do SEP em intervalos de tempo e/ou de potência. A seção 3.3 apresenta as formulações intermediárias à formulação final. A seção 3.4 apresenta a formulação e o planejamento que determina as ações de controle que minimizam as perdas nas linhas de transmissão e mantêm os requisitos operacionais do SEP simultaneamente satisfeitos para o caso base e a lista de contingências ao longo do dia. A seção 3.5 mostra a metodologia e formulação proposta, nesta dissertação, para determinar a contingência crítica do SEP e o valor de carregamento em que esta se torna crítica. A seção 3.6 apresenta o planejamento da operação do SEP que minimiza as perdas nas linhas de transmissão e o risco operacional do sistema. A seção 3.7 apresenta a formulação e o planejamento que determina as ações de controle que maximizam a margem de carregamento do SEP e mantêm os requisitos operacionais do SEP simultaneamente satisfeitos para o caso base e a lista de contingências ao longo do dia. A seção 3.8 mostra as considerações finais sobre as formulações, metodologias e estratégias propostas nesta dissertação.

3.1. Curvas de carga horária do SEP

Há tempos o avanço tecnológico possibilita que, cada vez mais, maiores quantidades de informação sejam amostradas e armazenadas em bancos de dados. Em um SEP, a análise

desses dados possibilita analisar padrões e tendências no comportamento de carga durante a operação do sistema ao longo do dia e realizar a previsão de carga do SEP durante determinada hora do dia, dia da semana e época do ano. A demanda do sistema pode sofrer grandes variações, não programadas, quando comparadas às tendências diárias de consumo devido a diversos fatores, tais como, feriados, mudanças climáticas e eventos (Transmissão da Copa do Mundo de Futebol). Portanto, nota-se a necessidade de incluir nos registros dos bancos de dados todo tipo de informação, tais como: temperatura, dia da semana, feriado, eventos, entre outros, a fim de realizar o cruzamento dos dados e estimar com maior precisão o consumo no SEP.

No Brasil, o ONS (Operador Nacional do Sistema) é o órgão responsável por gerenciar os dados obtidos do SIN (Sistema Interligado Nacional). Como exemplo, em (Ons, 2018) podem ser obtidos os dados das curvas de carga horária do SEP, onde o usuário pode escolher o tipo de informação que deseja obter e o período de tempo de interesse. O ONS subdivide o Brasil em quatro subsistemas, Nordeste, Norte, Sudeste/Centro-Oeste e Sul, onde é possível obter os dados de consumo de todo o SIN e também os dados de consumo de cada subsistema separadamente.

Muitos trabalhos e pesquisas utilizam a premissa de que o comportamento da carga do SEP é conhecido. O objetivo dessa seção é mostrar alguns dos dados de consumo que podem ser obtidos através do banco de dados do ONS e como a utilização desses dados pode auxiliar na previsão de carga do sistema ao longo do dia.

Como exemplo, a figura 3.1 mostra a curva de carga horária que pode ser obtida através do banco de dados do ONS. O período da amostra selecionado foi das 00h do dia 12/12/2017 às 00h do dia 13/12/2017 e foi escolhida a demanda de todo o SIN e de cada subsistema, conforme indicado na figura.

Figura 3.1: Curva de carga horária do SIN brasileiro (ONS).

As figuras 3.2-3.3 apresentam comparativos entre as demandas em dois períodos, a fim de mostrar como o comportamento do sistema elétrico pode ser estimado. A figura 3.2 compara o consumo do SEP entre duas semanas subsequentes e a figura 3.3 mostra a diferença percentual entre as duas curvas de carga, onde a diferença entre as demandas foi calculada, para cada hora do dia, por (3.1).

$$D = \frac{Demanda(11.12.2017 - hora) - Demanda(04.12.2017 - hora)}{Demanda(11.12.2017 - hora)} * 100\% \quad (3.1)$$

Figura 3.2: Curvas de carga horária semanal para duas semanas consecutivas (ONS).

Figura 3.3: Diferença percentual entre as demandas de duas semanas consecutivas (ONS).

A figura 3.4 mostra a diferença entre o consumo por subsistema considerando o mesmo período anterior.

Figura 3.4: Diferença percentual entre as demandas, por subsistema, de duas semanas consecutivas (ONS).

A figura 3.5 mostra a diferença percentual do consumo entre dois dias subsequentes para cada subsistema.

Figura 3.5: Diferença percentual entre as demandas, por subsistema, de dois dias consecutivos (ONS).

Observando as figuras, podemos notar que a demanda do SEP apresenta um padrão característico, sendo possível estimar a demanda do SEP ao longo do dia, baseando-se em

informações, armazenada no banco de dados, da demanda de dias anteriores e, portanto, podemos concluir que o crescimento de carga do SEP é conhecido.

3.2. Discretização intervalar do período de análise do SEP

A figura 3.6 mostra a curva de carga de todo o SIN brasileiro ao longo de um dia arbitrário.

Figura 3.6: Curva de carga horária do SIN brasileiro (ONS).

Idealmente, a cada instante de tempo, ao longo do dia, o operador do sistema deveria determinar e aplicar ações de controle ao SEP, a fim de atender aos objetivos e aos requisitos de operação. Entretanto, não é possível realizar chaveamentos nos dispositivos controlados em intervalos de tempo pequenos e também não é desejável, pois quanto maior o número de chaveamentos nos dispositivos controlados, maiores são os desgastes nestes equipamentos, implicando em maior custo de manutenção. Além do mais, em sistemas de grande porte, o tempo gasto nas simulações para determinar os estados da rede, utilizando algum método de otimização, é elevado e pode inviabilizar o processo. Portanto, devemos analisar o SEP dentro de um intervalo de tempo e de potência, onde, neste intervalo, as restrições operacionais e demanda do SEP devem ser satisfeitas. Podemos realizar essa discretização em intervalos de tempo de duas formas.

Os intervalos de tempo podem ser divididos considerando-se incrementos/decrementos constantes na demanda, figura 3.7, ou em intervalos de tempos iguais, figura 3.8.

Figura 3.7: Divisão dos intervalos de tempo considerando incrementos constantes na potência do SEP.

Figura 3.8: Divisão dos intervalos de tempo considerando intervalos de tempo constantes.

Como pode ser observado na curva de carga horária, em determinados instantes do dia ocorre um grande aumento na demanda do sistema em um curto intervalo de tempo e quando

os intervalos de tempo são divididos em espaçamentos de tempos iguais, pode ser que seja grande a diferença de potência entre dois pontos consecutivos e, às vezes, pode não ser possível encontrar solução para os estados dos dispositivos controlados que mantenham o SEP dentro da região factível durante o intervalo de tempo especificado.

Por outro lado, dividindo-se os intervalos de tempo considerando incrementos constantes na demanda entre um intervalo e outro, pode ser que o intervalo de tempo entre dois pontos consecutivos seja muito pequeno exigindo o acionamento dos dispositivos de controles em curtos intervalos de tempo. Portanto, deve existir um compromisso entre a diferença de potência e o intervalo de tempo, a fim de que seja possível determinar as ações de controle que atendam aos requisitos de operação e que seja possível aplicar as ações de controle definidas entre um intervalo de tempo e outro.

Nesta dissertação, por simplicidade, foi considerado que, durante o período analisado, as potências ativas e reativas nas barras de carga e as potências ativas nas barras de geração foram incrementadas linearmente e proporcionalmente às suas potências iniciais. Sendo S_0 a demanda do SEP no tempo t_0 , a demanda do sistema nos tempos posteriores foi calculada por (3.2).

$$S(t) = S_0 + \alpha t \quad (3.2)$$

onde α é a taxa de variação da demanda em relação ao tempo. A figura 3.9 mostra o crescimento da demanda do sistema em relação ao tempo.

Figura 3.9: Crescimento de carga linear e proporcional à potência especificada inicial.

3.3. Formulações gerais para os problemas que determinam as ações de controle do SEP

Esta seção tem por objetivo apresentar as formulações para os problemas que determinam as ações de controle de um SEP, bem como caracterizar e quantificar as restrições e as variáveis de controle que foram consideradas nas formulações desses problemas.

Conforme mencionado, inicialmente, o problema foi formulado para avaliar o SEP em apenas um nível de carregamento e considerando somente o caso base. Sendo assim, considere um SEP com n barras, constituído por n_{PQ} barras de carga, n_{PV} barras de geração e uma barra de referência (θV). Considere que as potências ativas e reativas nas barras de carga são conhecidas, as potências ativas nas barras PV foram determinadas pelo operador e seja $f(x)$ a função objetivo a ser minimizada no problema.

O objetivo da resolução deste problema é determinar os estados dos dispositivos controlados que minimizam a função objetivo e mantêm as restrições do sistema dentro da região factível de operação. Porém, antes de apresentar a formulação deste problema, devemos definir quais são as variáveis de controle do sistema e as restrições que devem ser satisfeitas.

As subseções 3.3.1 – 3.3.3 caracterizam e quantificam as variáveis e as grandezas do SEP utilizadas na formulação do problema, bem como as restrições que devem ser satisfeitas em sua resolução.

3.3.1. Variáveis do SEP

Basicamente, em um SEP, existem três tipos de variáveis na formulação de um problema para determinar as ações de controle de um SEP, as variáveis relacionadas às tensões das barras de carga, as variáveis relacionadas aos ângulos das barras PV e PQ e as variáveis relacionadas aos dispositivos controlados do SEP. Dentre as variáveis relacionadas aos dispositivos controlados temos: a tensão de referência nas barras PV e θV , os *Tap's* dos transformadores e os ajustes dos dispositivos compensadores de potência reativa (reatores e banco de capacitores). As variáveis relacionadas aos dispositivos controlados são as variáveis independentes do problema, cujos valores são determinados na resolução do problema, de modo a minimizar determinada função objetivo e satisfazer as restrições do problema. As

demais variáveis são variáveis dependentes, as quais são determinadas na resolução do problema de forma a fechar o balanço de potência do SEP.

Em um sistema com n_{PQ} barras de carga, n_{PV} barras *PV* e uma barra de referência, temos:

- n_{θ} variáveis relacionadas aos ângulos das barras de carga e de geração (*PV*), portanto, $n_{\theta} = (n_{PQ} + n_{PV})$.
- n_V variáveis relacionadas às tensões nas barras de carga, portanto, $n_V = n_{PQ}$.

As variáveis referentes aos dispositivos controlados são subdivididas em duas classes: variáveis contínuas e variáveis discretas. As variáveis contínuas estão relacionadas com as tensões de referência dos geradores das barras *PV* e θ_V e as variáveis discretas estão relacionadas aos *Tap's* dos transformadores e aos ajustes de reatores e de banco de capacitores.

Seja n_{TR} o número de transformadores do SEP, n_{SH} o número de banco de capacitores ou reatores *shunt* e n_G o número de geradores do SEP (3.3). O número total de variáveis relacionadas aos dispositivos controlados n_{μ} é dado por (3.4).

$$n_G = (n_{PV} + 1) \quad (3.3)$$

$$n_{\mu} = (n_{TR} + n_{SH} + n_G) \quad (3.4)$$

O número total de variáveis (n_E) para este SEP é dado por (3.5).

$$n_E = (n_{TR} + n_{SH} + n_G + 2 * n_{PQ} + n_{PV}) = (n_{TR} + n_{SH} + n_G + n_{\theta} + n_V) \quad (3.5)$$

3.3.2. Restrições de desigualdade

Conforme mencionado, o SEP deve permanecer dentro de uma região factível de operação. Essa região factível de operação está relacionada aos limites operacionais do SEP, tais como: os limites físicos dos elementos do sistema e os níveis de tensão aceitáveis nas barras. Na formulação do problema de otimização, os limites operacionais são formulados como restrições de desigualdade e diversas restrições de desigualdade podem compor o problema, tais como: limites superiores e inferiores para as tensões nas barras, para as potências reativas geradas, para os *Tap's* e para a compensação de reativos dos bancos de

capacitores e reatores e limite superior de corrente nas linhas de transmissão, entre outros. Por simplicidade, neste trabalho foram considerados somente os limites indicados em (3.6).

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max}$$

$$t_{km}^{min} \leq t_{km} \leq t_{km}^{max}$$

$$Bsh_k^{min} \leq Bsh_k \leq Bsh_k^{max} \quad (3.6)$$

$$Q_{G_k}^{min} \leq Q_G^k(V, \theta, t_{km}) \leq Q_{G_k}^{max}$$

$$Q_G^k(V, \theta, t_{km}) = Q_L^k - \sum_{m \in \Omega_k} (b_{km} + b_{km}^{sh})(t_{km} V_k)^2 + t_{km} V_k V_m (-g_{km} \sin \theta_{km} + b_{km} \cos \theta_{km})$$

onde,

- t_{km} é o valor do *tap* do transformador do ramo km
- t_{km}^{min} e t_{km}^{max} são os limites inferior e superior, respectivamente, para o *tap* do transformador do ramo km
- g_{km} e b_{km} são os valores da condutância e susceptância série, respectivamente, da linha de transmissão que conecta a barra k a barra m
- b_{km}^{sh} é o valor da susceptância *shunt* da linha de transmissão que liga a barra k a barra m
- θ_{km} é a diferença angular entre as barras k e m
- V_k é o valor da tensão na barra k
- V_k^{min} e V_k^{max} são os limites inferior e superior, respectivamente, da barra k
- Bsh_k é o valor da admitância *shunt* conectada a barra k
- Bsh_k^{min} e Bsh_k^{max} são os limites inferior e superior, respectivamente, da admitância *shunt* conectada a barra k
- $Q_G^k(V, \theta, t_{km})$ é o valor calculado da potência reativa gerada pelo gerador conectado a barra k
- Ω_k é o conjunto das barras conectadas a barra k
- Q_L^k é o valor da potência reativa da carga conectada a barra k e
- $Q_{G_k}^{min}$ e $Q_{G_k}^{max}$ são os limites inferior e superior, respectivamente, da potência gerada pelo gerador conectado a barra k

Por simplicidade, não estamos considerando os limites de fluxo de potência nas linhas de transmissão, justifica-se isto admitindo que o planejamento diário para o despacho de

potência ativa, feito pelo operador do SEP, tenha sido realizado considerando tais restrições, mesmo que de forma simplificada através da resolução de um fluxo de carga *DC* (*Direct Current* – Corrente Contínua).

Na formulação do problema de otimização, cada limite, inferior ou superior, é formulado como uma restrição de desigualdade, sendo assim, o número total n_{RD} de restrições de desigualdade, considerando as restrições apresentadas em (3.6), é dado por (3.7).

$$n_{RD} = 2 * (n + n_{TR} + n_{SH} + n_G) \quad (3.7)$$

3.3.3. Restrições de igualdade

Também, conforme mencionado, o problema de otimização deve ser resolvido de forma a atender toda a demanda do SEP, isto é, o balanço de potência no SEP deve ser satisfeito, de modo que toda a potência gerada seja igual à soma das potências das cargas mais as potências perdidas nas linhas de transmissão do SEP. Os balanços de potência no SEP são modelados através das equações do fluxo de carga (3.8) e são denominados, na formulação do problema, como restrições de igualdade.

$$\begin{aligned} P_k^{esp} - \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V, \theta, t_{km}) &= 0 \quad k \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{PQ}\} \\ P_k^{esp} &= P_k^G - P_k^L \\ P_{km} &= g_{km}(t_{km}V_k)^2 - t_{km}V_kV_m(g_{km}\cos\theta_{km} + b_{km}\sin\theta_{km}) \\ Q_k^{esp} + Q_k^{sh}(V_k) - \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V, \theta, t) &= 0 \quad k \in \{\Omega_{PQ}\} \\ Q_k^{esp} &= -Q_k^L \\ Q_{km} &= -(b_{km} + b_{km}^{sh})(t_{km}V_k)^2 + t_{km}V_kV_m(-g_{km}\sin\theta_{km} + b_{km}\cos\theta_{km}) \\ Q_k^{sh} &= -B_{sh_k}V_k^2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

onde,

- Ω_{PV} e Ω_{PQ} são os conjuntos de barras do tipo *PV* e *PQ*, respectivamente.
- Ω_k é o conjunto das barras conectadas a barra k
- $Q_k^{sh}(V_k)$ é a compensação reativa do elemento *shunt* conectado a barra k
- P_k^{esp} e Q_k^{esp} são as potências ativa e reativa, respectivamente, especificadas na barra k
- P_k^L é a potência ativa da carga conectada a barra k

- Q_k^L é a potência reativa da carga conectada a barra k
- P_k^G é a potência ativa gerada pelo gerador conectado a barra k

Seja n_P o número total de equações para o balanço de potência ativa e n_Q o número total de equações para o balanço de potência reativa, dados por (3.9)-(3.10). O número total de equações para o balanço de potência do sistema, que compõe as restrições de igualdade do problema (n_{RI}), é dado por (3.11).

$$n_P = n_{PQ} + n_{PV} \quad (3.9)$$

$$n_Q = n_{PQ} \quad (3.10)$$

$$n_{RI} = (n_P + n_Q) = 2 * n_{PQ} + n_{PV} \quad (3.11)$$

3.3.4. Função objetivo

A proposta de resolver um problema através de algum método de otimização é encontrar uma solução para as variáveis e as grandezas do sistema que esteja dentro da região factível e, ainda, minimizar uma determinada função objetivo. A crescente competitividade no mercado de energia elétrica faz com que seja desejável operar o SEP com menor custo de operação. Dentre os custos de operação, que podem ser considerados em SEP, destacam-se a redução das perdas nas linhas de transmissão, a redução nos custos relativos à geração de potência ativa e a redução dos custos relativos ao número de chaveamentos dos dispositivos controlados. Implicitamente, reduzindo o número de chaveamentos, reduzem-se os desgastes dos equipamentos, postergando sua manutenção e assim reduzindo-se os custos.

Neste trabalho, foi considerado que os custos relacionados à geração de potência ativa já foram minimizados pelo operador do sistema e, portanto, as potências ativas nas barras de geração já foram especificadas pelo operador do SEP. Desse modo, a função objetivo a ser minimizada, no problema de otimização, deveria considerar o custo relativo às perdas de energia elétrica ($R\$/MWh$) nas linhas de transmissão e os custos de manutenção ocasionados pelos chaveamentos de qualquer dispositivo de controle ($R\$/\Delta\mu$), que seriam calculados por (3.12).

$$C_{total}(x) = P_{perdas} * C_{perdas} \left(\frac{R\$}{MWh} \right) + \Delta n_{\mu}^1 * C_{\mu}^1 \left(\frac{R\$}{\Delta\mu} \right) + \dots + \Delta n_{\mu}^n * C_{\mu}^n \left(\frac{R\$}{\Delta\mu} \right) \quad (3.12)$$

onde,

- P_{perdas} são as perdas nas linhas de transmissão
- C_{perdas} é o custo das perdas
- $\Delta n_{\mu}^1, \dots, \Delta n_{\mu}^n$ representa o chaveamento do dispositivo 1 ao n
- $C_{\mu}^1, \dots, C_{\mu}^n$ representa o custo do chaveamento do dispositivo 1 ao n

Entretanto, é difícil mensurar o custo causado pelos chaveamentos dos dispositivos controlados e, desse modo, nessa dissertação, quando a função objetivo estiver relacionada à redução nos custos de operação, por simplicidade, a função objetivo será restrita a minimização das perdas nas linhas de transmissão.

As perdas nas linhas de transmissão são calculadas pela soma das diferenças dos fluxos que saem de uma barra do sistema à outra, sendo calculadas por (3.13).

$$P_{perdas} = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n [g_{km} [(t_{km} V_k)^2 + V_m^2 - 2 t_{km} V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m)]] \quad (3.13)$$

$\forall m > k$

Neste trabalho, também foi utilizada a função objetivo de maximizar a margem de carregamento do SEP. Esta função objetivo foi utilizada tanto na formulação para minimizar as modificações nas ações de controle, quanto na formulação auxiliar para determinar as contingências críticas. As potências ativas e reativas do SEP foram parametrizadas pelo fator λ , de modo a especificar os valores das potências em função das potências iniciais das barras.

$$S^k(\lambda) = \lambda * S_0^k = \lambda * (P_0^k + jQ_0^k) \quad (3.14)$$

onde, P_0^k e Q_0^k são os valores iniciais das potências ativas e reativas, respectivamente, da barra k . Portanto, quando a função objetivo do problema estiver relacionada a maximizar a margem de carregamento do SEP é o mesmo que encontrar o máximo valor de λ .

Definidas as variáveis de controle e as restrições do SEP, a subseção 3.3.5 apresenta a formulação mais simples, clássica, para determinar as ações de controle do SEP.

3.3.5. Formulação para o problema de determinação das ações de controle do SEP em um nível de carregamento especificado S_0 avaliando somente o caso base

Nessa subseção, é apresentada a formulação mais simples do problema para determinação das ações de controle do SEP (3.17). A formulação (3.17) é a formulação clássica do fluxo de potência ótimo, muito utilizada em diversas pesquisas na área de SEP, onde somente o caso base é avaliado e somente um ponto de operação é obtido na resolução do problema.

Definida a topologia do SEP, considere que em determinado instante de tempo a demanda do sistema seja S_0 , onde S_0 é um vetor composto das potências ativas e reativas nas barras de carga (3.15) e potências ativas nas barras PV (3.16).

$$S_0^k = P_0^k + j Q_0^k \quad \forall k \in \Omega_{PQ} \quad (3.15)$$

$$S_0^k = P_0^k \quad \forall k \in \Omega_{PV} \quad (3.16)$$

A resolução do problema (3.17) determina os estados dos dispositivos controlados do SEP que minimizam uma função objetivo $f(x)$ qualquer e mantêm os estados e as grandezas do problema dentro da região factível em S_0 , onde x é um vetor que contém todas as variáveis do problema, tais como: as magnitudes das tensões, os ângulos de fase, os *Tap's* e a compensação reativa dos elementos *shunt* do SEP.

$$\begin{aligned}
 \min \quad & f(V_k, \theta_k, t_{km}, B_{sh_k}) \\
 & V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad k = 1, \dots, n \\
 & t_{km}^{min} \leq t_{km} \leq t_{km}^{max} \quad \forall k, m \in T \\
 \text{Sujeito à} \quad & B_{sh_k}^{min} \leq B_{sh_k} \leq B_{sh_k}^{max} \quad \forall k \in B \\
 & Q_{G_k}^{min} \leq Q_G^k(V, \theta, t_{km}) \leq Q_{G_k}^{max} \quad \forall k \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\} \quad (3.17) \\
 & P_k^{esp} - \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, \theta_k, V_m, \theta_m, t_{km}) = 0 \quad \forall k \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{PQ}\} \\
 & Q_k^{esp} + Q_k^{sh}(V_k) - \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, \theta_k, V_m, \theta_m, t_{km}) = 0 \quad \forall k \in \{\Omega_{PQ}\}
 \end{aligned}$$

onde,

- V_k é a tensão da barra k
- V_k^{min} e V_k^{max} são os limites inferior e superior de tensão, respectivamente, da barra k
- Q_G^k é o valor calculado da potência reativa na barra de geração k

- $Q_{G_k}^{min}$ e $Q_{G_k}^{max}$ são os limites inferior e superior, respectivamente, de potência reativa do gerador conectado a barra k
- P_k^{esp} e Q_k^{esp} são os valores especificados das potências ativa e reativa, respectivamente, na barra k
- T é o conjunto de ramos que possuem transformadores,
- B é o conjunto de barras que possuem elemento *shunt* conectado
- Ω_k é o conjunto de barras que se conectam a barra k

A resolução deste problema é capaz de garantir que:

- ✓ As magnitudes das tensões encontram-se dentro dos limites máximos e mínimos especificados no nível de carregamento S_0 para a condição topológica atual;
- ✓ Nenhum equipamento encontra-se sobrecarregado na condição topológica atual e no nível de carregamento S_0 ;
- ✓ É possível atender toda a demanda do SEP na condição topológica atual e no nível de carregamento S_0 .

Entretanto, a resolução deste problema não é capaz de garantir que:

- ✗ As magnitudes das tensões permaneçam dentro dos limites máximos e mínimos especificados, na condição topológica atual, mediante a um pequeno aumento ΔS na demanda do SEP;
- ✗ As magnitudes das tensões permaneçam dentro dos limites máximos e mínimos especificados, no nível de carregamento S_0 , na ocorrência de uma contingência;
- ✗ Não existam equipamentos sobrecarregados mediante a um pequeno aumento na demanda do SEP na condição topológica atual e nem no nível de carregamento S_0 na ocorrência de uma contingência;
- ✗ É possível atender toda a demanda do SEP na ocorrência de uma contingência no nível de carregamento S_0 ;
- ✗ Existe MET acima do valor mínimo especificado, nem para o caso base e nem para as contingências.

Podemos notar como a formulação clássica do Fluxo de Potência Ótimo (FPO) é deficiente, pois não existem garantias que diversos requisitos operacionais do sistema sejam satisfeitos. As subseções 3.3.6 – 3.3.8 apresentam formulações, intermediárias, para o problema de determinação das ações de controle do SEP que, gradativamente, irão melhorando o modelo, apresentando nas seções 3.4 e 3.7 as formulações finais para os

problemas que determinam as ações de controle de um SEP e garantem que todos os requisitos operacionais do SEP, inclusive as restrições de MET mínima de segurança, serão satisfeitos simultaneamente para o caso base e para uma lista de contingências.

3.3.6. Formulação para problema de determinação das ações de controle do SEP em um nível de carregamento especificado S_0 avaliando o caso base e a lista de contingências

Conforme exposto no capítulo 2, como requisito operacional do sistema, o operador do sistema deve garantir que o SEP esteja operando dentro dos limites operacionais, atendendo a demanda e permanecendo seguro para a condição topológica atual (caso base) e em casos de contingências. Por isso, as contingências devem ser incluídas na análise, de modo a garantir o fornecimento contínuo de energia elétrica e manter os requisitos de qualidade e segurança mesmo na ocorrência de alguma contingência. Portanto, o problema deve ser formulado de modo a determinar os estados dos dispositivos controlados que mantêm o balanço de potência do SEP para a condição topológica atual, caso base, e para todos os casos de uma lista de contingências, mantendo as restrições operacionais do sistema dentro dos limites permitidos.

Cabe salientar que, a lista de contingências deve ser definida seguindo os critérios de confiabilidade do operador do SEP, porém, devido ao fardo computacional para analisar diversas contingências, esta lista pode ser restringida as contingências mais prováveis ou as contingências críticas do SEP.

Neste trabalho, as contingências que provocam ilhamentos de carga no sistema não foram consideradas em nenhuma das formulações dos problemas que envolvem contingências, pois essas contingências devem ser modeladas de modo particular e as equações apresentadas são formulações generalizadas para as contingências.

Seja n_{NC} o número de contingências que compõem a lista de contingências do SEP, o número total de casos (n_C) a serem analisados é dado por (3.18).

$$n_C = n_{NC} + 1 \quad (3.18)$$

Considerando os n_C casos, o problema de otimização (3.17) é modificado e o número de variáveis não controladas n_θ e n_V passa a ser dado por,

$$n_\theta = n_C (n_{PQ} + n_{PV}) \quad (3.19)$$

$$n_V = n_C * n_{PQ} \quad (3.20)$$

Os valores das variáveis relacionadas aos dispositivos de controle devem ser os mesmos para todos os casos.

$$n_G = (n_{PV} + 1) \quad (3.21)$$

$$n_\mu = (n_{TR} + n_{SH} + n_G) \quad (3.22)$$

Novamente, as restrições de igualdade são obtidas através das equações dos balaços de potências do sistema, onde para a análise do sistema com n_C casos tem-se,

$$n_P = n_C (n_{PQ} + n_{PV}) \quad (3.23)$$

$$n_Q = n_C * n_{PQ} \quad (3.24)$$

$$n_{RI} = n_C * (2 * n_{PQ} + n_{PV}) \quad (3.25)$$

$$n_{RD} = n_{EC} + n_{ENC} \quad (3.26)$$

$$n_{EC} = 2 * (n_{TR} + n_{SH} + n_G) \quad (3.27)$$

$$n_{ENC} = n_C * 2 * (n_{PQ} + n_G) \quad (3.28)$$

onde, n_P e n_Q são os números totais de restrições de igualdade das potências ativas e reativas, respectivamente, n_{RD} é o número de restrições de desigualdade, n_{EC} é o número de restrições de desigualdade relacionadas às variáveis controladas e n_{ENC} é o número de restrições de desigualdade relacionadas às variáveis não controladas.

Sejam as variáveis do caso base e da lista de contingências representadas pelo índice i e, especificamente, o caso base representado pelo índice $i = 0$. A formulação do problema de otimização que avalia o SEP em dado nível de carregamento $S_0(t_i)$ e determina os estados dos dispositivos controlados para minimizar uma função objetivo $f(x)$ qualquer e satisfazer as restrições operacionais e de demanda do sistema, simultaneamente, para o caso base e uma lista de contingências, é dada por (3.29).

$$\min f(x)$$

Sujeito à

$$\begin{aligned} V_g^{min} &\leq V_g \leq V_g^{max} & \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\} \\ V_m^{min} &\leq V_m^i \leq V_m^{max} & \forall m \in \Omega_{PQ} \text{ e } i = 0, \dots, n_{NC} \\ t_{km}^{min} &\leq t_{km} \leq t_{km}^{max} & \forall k, m \in \mathbf{T} \\ Bsh_k^{min} &\leq Bsh_k \leq Bsh_k^{max} & \forall k \in \mathbf{B} \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned}
Q_{G_k}^{min} &\leq Q_G^{k,i}(V, \theta, t_{km}) \leq Q_{G_k}^{max} & \forall k \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\} \text{ e } i = 0, \dots, n_{NC} \\
P_k^{esp} - \sum_{m \in \Omega_{mk}} P_{km}^i(V_k^i, \theta_k^i, V_m^i, \theta_m^i, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gk}} P_{kg}^i(V_k^i, \theta_k^i, V_g, \theta_g^i, t_{kg}) &= 0 \\
&\forall k, m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC} \\
P_G^{esp} - \sum_{m \in \Omega_{mG}} P_{Gm}^i(V_G, \theta_G^i, V_m^i, \theta_m^i, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gG}} P_{Gg}^i(V_G, \theta_G^i, V_g, \theta_g^i, t_{kg}) &= 0 \quad (3.29) \\
&\forall m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall G \in \{\Omega_{PV}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC} \\
Q_k^{esp} + Q_k^{sh}(V_k^i) - \sum_{m \in \Omega_{mk}} Q_{km}^i(V_k^i, \theta_k^i, V_m^i, \theta_m^i, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{mk}} Q_{kg}^i(V_k^i, \theta_k^i, V_g, \theta_g^i, t_{kg}) &= 0 \\
&\forall m, k \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}
\end{aligned}$$

onde,

- V_g é a tensão de referência na barra de geração g
- V_g^{min} e V_g^{max} são os limites inferior e superior de tensão, respectivamente, da barra g
- V_m^i é a tensão da barra de carga m para o caso i
- V_k^{min} e V_k^{max} são os limites inferior e superior de tensão, respectivamente, da barra k
- $Q_G^{k,i}$ é o valor calculado da potência reativa na barra de geração k para o caso i
- $Q_{G_k}^{min}$ e $Q_{G_k}^{max}$ são os limites inferior e superior, respectivamente, de potência reativa do gerador conectado a barra k
- P_k^{esp} e Q_k^{esp} são os valores especificados das potências ativa e reativa, respectivamente, na barra de carga k
- P_G^{esp} é o valor especificado da potência ativa do gerador conectado a barra de geração G
- P_{km}^i e Q_{km}^i são os valores calculados dos fluxos de potência ativa e reativa, respectivamente, no ramo que liga a barra de carga k à barra de carga m para o caso i
- P_{kg}^i e Q_{kg}^i são os valores calculados dos fluxos de potência ativa e reativa, respectivamente, no ramo que liga a barra de carga k à barra de geração g para o caso i
- P_{Gg}^i é o valor calculado do fluxo de potência ativa no ramo que liga a barra de geração G à barra de geração g para o caso i

- P_{Gm}^i é o valor calculado do fluxo de potência ativa no ramo que liga a barra de geração G à barra de carga m para o caso i
- Ω_{mk} é o conjunto de barras de carga m que se conectam a barra de carga k
- Ω_{gk} é o conjunto de barras de geração g que se conectam a barra de carga k
- Ω_{mG} é o conjunto de barras de carga m que se conectam a barra de geração G
- Ω_{gG} é o conjunto de barras de geração g que se conectam a barra de geração G

Cabe salientar que, as equações que calculam os fluxos de potências, ativa e reativa, foram separadas em duas partes, principalmente, para evidenciar que as tensões de referência dos geradores têm os mesmos valores para o caso base e todas as contingências ($i = 0, \dots, n_{NC}$). A resolução deste problema é capaz de garantir que as restrições operacionais e de demanda do SEP são satisfeitas, simultaneamente, para o caso base e a lista de contingências no nível de carregamento S_0 . Porém, as ações de controle obtidas não são capazes de garantir que as restrições continuem satisfeitas diante a um pequeno aumento nas potências do SEP e nem de garantir que as MET sejam, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado.

Além disso, conforme exposto na seção 3.2, não é possível alterar as ações de controle em pequenos intervalos de tempo, sendo assim, é necessário estabelecer um intervalo de potência S_0 a $S_0 + \Delta S$ para que o operador do sistema possa determinar e impor as ações de controle ao SEP. Portanto, é necessário formular o problema considerando este intervalo de potência, de modo que as ações de controle determinadas na resolução do problema mantenham os requisitos operacionais do SEP durante determinado acréscimo de carga, além de considerar as contingências. A seção 3.3.7 mostra a formulação deste problema avaliando somente o caso base e na seção 3.3.8 o problema é formulado avaliando o caso base e a lista de contingências.

3.3.7. Formulação para o problema de determinação das ações de controle de um SEP considerando um intervalo de acréscimo de carga $S_0 + \Delta S$ avaliando o caso base

Na seção 3.1, foi mostrado que é possível estimar a demanda do SEP ao longo do dia e, na seção 3.2, foram apresentados alguns motivos para considerar a discretização do período de análise do SEP em intervalos de potências.

Em face ao exposto, consideremos o SEP em um dado nível de carregamento inicial, cujas demandas e potências geradas nas barras são conhecidas ($S_0(t_0)$). Considere, como exemplo, a curva de carga horária da figura 3.10 e a variação lenta de carga no SEP de S_0 a S_1 , cujo tempo associado a essa variação é suficiente para determinar e impor as ações de controle ao SEP.

No nível de carregamento $S_0(t_0)$, o operador do sistema determina e impõe as ações de controle necessárias para manter as variáveis e as grandezas do SEP dentro da região factível até o nível de carregamento $S_1(t_1)$, onde, em $S(t_1)$, o operador irá determinar e impor novas ações de controle para manter as variáveis e as grandezas do SEP dentro da região factível durante o próximo intervalo de potência ($S(t_1)$ a $S(t_2)$) e assim sucessivamente.

Figura 3.10: Curva de carga entre dois instantes de tempo t_0 e t_1 .

onde, S_0 e S_1 são vetores compostos com os valores das potências ativas e reativas nas barras de carga e potências ativas nas barras *PV* do SEP.

Sendo assim, a formulação para o problema de otimização que determina os estados dos dispositivos controlados, de modo a minimizar uma função objetivo $f(x)$ qualquer e manter as variáveis e as grandezas do SEP dentro da região factível de operação durante a variação de potência de S_0 a S_1 é dado por,

$$\min f(x)$$

Sujeito à

$$\begin{aligned}
V_g^{\min} &\leq V_g \leq V_g^{\max} & \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\} \\
V_m^{\min} &\leq V_m^j \leq V_m^{\max} & \forall m \in \Omega_{PQ} \text{ e } j = 0, 1 \\
t_{km}^{\min} &\leq t_{km} \leq t_{km}^{\max} & \forall k, m \in \mathbf{T} \\
Bsh_k^{\min} &\leq Bsh_k \leq Bsh_k^{\max} & \forall k \in \mathbf{B} \\
Q_{G_k}^{\min} &\leq Q_G^{k,j}(V, \theta, t_{km}) \leq Q_{G_k}^{\max} & \forall k \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\} \text{ e } j = 0, 1 \\
P_k^j - \sum_{m \in \Omega_{mk}} P_{km}^j(V_k^j, \theta_k^j, V_m^j, \theta_m^j, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gk}} P_{kg}^j(V_k^j, \theta_k^j, V_g, \theta_g^j, t_{kg}) &= 0 & (3.30) \\
\forall k, m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, j = 0, 1 \\
P_G^j - \sum_{m \in \Omega_{mG}} P_{Gm}^j(V_G, \theta_G^j, V_m^j, \theta_m^j, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gG}} P_{Gg}^j(V_G, \theta_G^j, V_g, \theta_g^j, t_{Gg}) &= 0 \\
\forall m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall G \in \{\Omega_{PV}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, j = 0, 1 \\
Q_k^j + Q_k^{sh}(V_k^j) - \sum_{m \in \Omega_{mk}} Q_{km}^j(V_k^j, \theta_k^j, V_m^j, \theta_m^j, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gk}} Q_{kg}^j(V_k^j, \theta_k^j, V_g, \theta_g^j, t_{kg}) &= 0 \\
\forall m, k \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, j = 0, 1
\end{aligned}$$

onde, o índice j indica o valor de determinado estado ou grandeza para o respectivo nível de carregamento S^j . Por exemplo, V_k^0 e V_k^1 são os valores das tensões na barra de carga k nos níveis de carregamentos S^0 e S^1 , respectivamente. O raciocínio é análogo para as outras variáveis e grandezas do sistema.

Cabe salientar que, para garantir que o problema seja resolvido de forma que as restrições operacionais estejam dentro da região factível durante todo o intervalo de potência especificado e avaliando o SEP em um menor número de pontos possível, pois quanto mais níveis de carregamento forem incluídos na análise, maior será o tempo gasto nas simulações, as condições *i* e *ii* devem ser satisfeitas:

- i.* A demanda do sistema durante o intervalo de tempo deve permanecer dentro dos valores de demanda nos dois pontos extremos analisados. Isto é, seja $S(t)$ o valor das potências em função do tempo ao longo de um dia. Se $S(t_n) \leq S(t_{n+1})$, então

$(S(t_n) \leq S(t) \leq S(t_{n+1}) \quad \forall t \in [t_n, t_{n+1}])$. Se $S(t_n) \geq S(t_{n+1})$, então $(S(t_n) \geq S(t) \geq S(t_{n+1}) \quad \forall t \in [t_n, t_{n+1}])$.

- ii. Os geradores devem ter capacidade de geração de potência ativa para acompanhar o incremento na demanda do sistema.

As condições acima mencionadas devem ser satisfeitas para todas as formulações que realizam a avaliação do SEP em um intervalo de potências, isto é, em mais de um nível de carregamento.

3.3.8. Formulação para o problema de determinação das ações de controle de um SEP considerando um intervalo de acréscimo de carga $S_0 + \Delta S$ avaliando o caso base e a lista de contingências

Para manter as variáveis e as grandezas do SEP dentro da região factível de operação e garantir o fornecimento contínuo de energia elétrica, além de manter as variáveis e as grandezas do sistema dentro da região factível durante a variação na demanda do SEP de S_0 a S_1 para a topologia corrente, o mesmo deve ser garantido para os casos de contingência. Portanto, uma lista de contingências deve ser incluída na formulação do problema (3.30) a ser otimizado. A lista de contingências a ser considerada na formulação do problema pode ser definida seguindo vários critérios, por exemplo, o ONS diz que a lista de contingências deve conter todas as contingências seguindo o critério de confiabilidade N-1, conforme exposto no capítulo 2. Porém, devido a grande quantidade de contingências a serem analisadas, seguindo a este critério, e o fardo computacional para a resolução do problema, a lista de contingências pode ser restringida às contingências com maior probabilidade de ocorrência ou às contingências mais críticas do SEP.

Independente do critério utilizado para considerar a lista de contingências, incluindo uma lista de contingências qualquer ao problema (3.30), a formulação do problema de otimização que determina as ações de controle de um SEP, de modo a minimizar uma função $f(x)$ qualquer e manter as variáveis e as grandezas do sistema dentro da região factível de operação, simultaneamente para o caso base e a lista de contingências, durante um intervalo de potência S_0 a S_1 , é dada por,

$$\min f(x)$$

Sujeito à

$$V_g^{\min} \leq V_g \leq V_g^{\max} \quad \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}$$

$$V_m^{\min} \leq V_m^{i,j} \leq V_m^{\max} \quad \forall m \in \Omega_{PQ}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 0, 1$$

$$t_{km}^{\min} \leq t_{km} \leq t_{km}^{\max} \quad \forall k, m \in \mathbf{T}$$

$$Bsh_k^{\min} \leq Bsh_k \leq Bsh_k^{\max} \quad \forall k \in \mathbf{B}$$

$$Q_{G_k}^{\min} \leq Q_G^{k,i,j}(V, \theta, t_{km}) \leq Q_{G_k}^{\max}$$

$$\forall k \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, \quad i = 0, \dots, n_{NC}, \quad j = 0, 1$$

$$P_k^j - \sum_{m \in \Omega_{mk}} P_{km}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gk}} P_{kg}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{kg}) = 0 \quad (3.31)$$

$$\forall k, m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 0, 1$$

$$P_G^j - \sum_{m \in \Omega_{mG}} P_{Gm}^{i,j}(V_G, \theta_G^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gG}} P_{Gg}^{i,j}(V_G, \theta_G^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{Gg}) = 0$$

$$\forall m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall G \in \{\Omega_{PV}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 0, 1$$

$$Q_k^j + Q_k^{sh}(V_k^{i,j}) - \sum_{m \in \Omega_{mk}} Q_{km}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gk}} Q_{kg}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{kg}) = 0$$

$$\forall m, k \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 0, 1$$

onde,

- O índice $j = 0$ e 1 representa os dois níveis de carregamento em que o SEP será avaliado, cujas potências especificadas são $S^0(t_0)$ e $S^1(t_1)$, respectivamente,
- V_g é a tensão de referência na barra de geração g , com valor constante durante o intervalo de tempo t_0 a t_1 , para o caso base e contingências,
- $V_m^{i,j}$ é o valor da tensão na barra de carga m para o caso i e potências especificadas S^j ,
- $Q_G^{k,i,j}$ é o valor calculado da potência reativa na barra de geração k para o caso i e potências especificadas S^j ,
- P_k^j e Q_k^j são os valores especificados das potências ativa e reativa, respectivamente, na barra de carga k e potências especificadas S^j ,

- P_G^j é o valor especificado da potência ativa na barra de geração G e potências especificadas S^j ,
- $P_{km}^{i,j}$ e $Q_{km}^{i,j}$ são os valores calculados dos fluxos de potência ativa e reativa, respectivamente, no ramo que liga a barra de carga k à barra de carga m para o caso i e potências especificadas S^j ,
- $P_{kg}^{i,j}$ e $Q_{kg}^{i,j}$ são os valores calculados dos fluxos de potência ativa e reativa, respectivamente, no ramo que liga a barra de carga k à barra de geração g para o caso i e potências especificadas S^j e
- $P_{Gg}^{i,j}$ é o valor calculado do fluxo de potência ativa no ramo que liga a barra de geração G à barra de geração g para o caso i e potências especificadas S^j .

A resolução do conjunto de equações (3.31) determina as ações de controle do SEP que minimizam a função objetivo $f(x)$ e mantêm as variáveis e as grandezas do sistema dentro da região factível de operação, simultaneamente para o caso base e a lista de contingências, no intervalo de potência S_0 a S_1 . Na resolução do problema são obtidos dois pontos de operação para cada caso analisado no problema, um ponto de operação em S_0 e outro ponto de operação em S_1 .

Embora a resolução deste problema garanta que as ações de controle determinadas mantêm as variáveis e as grandezas do sistema dentro da região factível de operação no intervalo de S_0 a S_1 , a resolução deste problema não garante que as MET sejam, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado. Portanto, mais um nível de carregamento S_2 deve ser especificado no conjunto de equações, cujo valor está relacionado ao valor da MET mínima de segurança especificado pelo operador do SEP. Este problema é formulado na seção 3.4.

3.4. Formulação proposta para determinar as ações de controle do SEP que minimizam as perdas nas linhas de transmissão, garantem os requisitos operacionais, inclusive as restrições de MET mínima de segurança, satisfeitas durante um acréscimo de carga especificado

Essa seção apresenta a primeira contribuição desta dissertação, a qual consiste em fornecer uma formulação para o problema que determina as ações de controle do SEP capazes de manter as restrições operacionais do SEP satisfeitas, inclusive a restrição de MET mínima

de segurança, simultaneamente para o caso base e uma lista de contingências durante um acréscimo de carga especificado.

Conforme mencionado, além de manter os estados e as grandezas do SEP dentro da região factível de operação e atender a demanda durante um intervalo de potência especificado, também é necessário garantir que a MET seja, no mínimo, igual ao valor de segurança especificado pelo operador do sistema, para o caso base e a lista de contingências, a fim de evitar o colapso de tensão no SEP. Seja $MET_{segurança}^{mínima}$ o valor percentual da margem de estabilidade de tensão mínima de segurança especificado pelo operador do sistema.

Foi visto na seção 3.3.8 que, embora a resolução do problema (3.31) determine as ações de controle que mantêm as variáveis e as grandezas do SEP dentro da região factível de operação, simultaneamente para o caso base e a lista de contingências, de S_0 a S_1 , essas ações de controle não garantiam que as MET sejam, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado e, portanto, mais um nível de carregamento S_2 deveria ser adicionado ao conjunto de equações.

Considere novamente um intervalo de variação nas potências do sistema de S_0 a S_1 . No nível de carregamento S_0 o operador do sistema deve impor as ações de controle necessárias para que o SEP seja mantido dentro da região factível durante todo o aumento na demanda de S_0 a S_1 e, ao final desse intervalo, ainda possuir MET, no mínimo, igual ao valor mínimo de segurança pré-definido, para o caso base e a lista de contingências, onde o valor da MET é calculado a partir do nível de carregamento S_1 .

Sendo assim, para garantir que as restrições operacionais, as restrições de demanda, as restrições de segurança e a restrição de margem de estabilidade de tensão mínima de segurança sejam satisfeitas, em cada intervalo de potência, o conjunto de equações deve avaliar o SEP em três níveis de carregamento $S_0 = S(t_n)$, $S_1 = S(t_{n+1})$ e $S_2 = S(S_1)$, sendo que, no terceiro nível de carregamento, os valores das tensões podem estar fora dos limites operacionais especificados e os valores das potências especificadas em S_2 são calculados por (3.32).

$$S_2 = S_1 * \left(1 + \left(\frac{MET_{especificada}^{mínima} (\%)}{100}\right)\right) \quad (3.32)$$

Utilizando as curvas PV , a figura 3.11 ilustra os três níveis de carregamento em que o SEP é avaliado.

Figura 3.11: Ilustração dos três pontos de avaliação do SEP

Representando através do índice $j = 0, 1$ e 2 os valores das variáveis e das grandezas do SEP nos três níveis de carregamento do sistema $S_0(t_n)$, $S_1(t_{n+1})$ e $S_2 = S_1(t_{n+1}) * (1 + (\frac{MET_{especificada}^{minima}(\%)}{100}))$, respectivamente, a formulação deste problema de otimização é dada por,

$$\min P_{erdas} = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n [g_{km} [(t_{km} V_k)^2 + V_m^2 - 2 t_{km} V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m)]] \quad \forall m > k$$

Sujeito à

$$\begin{aligned} V_g^{min} &\leq V_g \leq V_g^{max} & \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\} \\ V_m^{min} &\leq V_m^{i,j} \leq V_m^{max} & \forall m \in \Omega_{PQ}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 0, 1 \\ t_{km}^{min} &\leq t_{km} \leq t_{km}^{max} & \forall k, m \in T \\ Bsh_k^{min} &\leq Bsh_k \leq Bsh_k^{max} & \forall k \in B \end{aligned} \quad (3.33)$$

$$Q_{G_k}^{min} \leq Q_G^{k,i,j}(V, \theta, t_{km}) \leq Q_{G_k}^{max}$$

$$\forall k \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, \quad i = 0, \dots, n_{NC}, \quad j = 0, 1, 2$$

$$P_k^j - \sum_{m \in \Omega_{mk}} P_{km}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gk}} P_{kg}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{kg}) = 0$$

$$\forall k, m \in \{\Omega_{PQ}\}, \quad \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, \quad i = 0, \dots, n_{NC}, \quad j = 0, 1, 2$$

$$\begin{aligned}
P_G^j - \sum_{m \in \Omega_{mG}} P_{Gm}^{i,j}(V_G, \theta_G^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gG}} P_{Gg}^{i,j}(V_G, \theta_G^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{Gg}) &= 0 \\
\forall m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall G \in \{\Omega_{PV}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 0, 1, 2 \\
Q_k^j + Q_k^{sh}(V_k^{i,j}) - \sum_{m \in \Omega_{mk}} Q_{km}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{kg}} Q_{kg}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{kg}) &= 0 \\
\forall m, k \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 0, 1, 2
\end{aligned} \tag{3.33}$$

É importante salientar que, se o problema de otimização (3.33) apresentar solução, então os balanços de potências foram satisfeitos em todos os níveis de carregamento em que o SEP foi avaliado, para o caso base e a lista de contingências, e ao garantir que os balanços de potências foram satisfeitos no terceiro nível de carregamento, garante-se que as MET sejam, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado para todos os i casos, pois se algum caso apresentasse MET menor que o valor mínimo de segurança especificado, não haveria ponto de operação factível para o SEP e o problema de otimização (3.33) não apresentaria solução.

Portanto, a resolução do problema (3.33) determina as ações de controle do SEP que minimizam as perdas de energia elétrica nas linhas de transmissão, mantêm as variáveis e as grandezas do sistema dentro da região factível de operação e asseguram que as MET sejam, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado, simultaneamente para o caso base e a lista de contingências, durante o intervalo de potência especificado. Dessa forma, o operador do SEP pode planejar a operação do SEP, determinando uma sequência de ações de controle para manter os requisitos operacionais do SEP satisfeitos ao longo de toda a operação. A seção 3.4.1 mostra como este planejamento pode ser realizado.

Cabe salientar novamente que, formulando o problema desta forma, qualquer função objetivo pode ser minimizada ou maximizada na resolução do problema, pois a solução obtida irá garantir que todos os requisitos operacionais estarão satisfeitos, inclusive as restrições de margem de estabilidade de tensão mínima de segurança.

3.4.1. Determinação da sequência das ações de controle para realizar o planejamento da operação do SEP que minimiza as perdas nas linhas de transmissão

Vimos na seção anterior que, a resolução do conjunto de equações (3.33) garante que as ações de controle, determinadas na resolução do problema, mantêm todos os requisitos operacionais do SEP satisfeitos durante o intervalo de potência especificado. Resolvendo o conjunto de equações (3.33) para todos os intervalos de potências previamente especificados, obtém-se uma sequência de ações de controle que mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos durante todo o período.

Considere que o período de tempo de interesse seja o intervalo de t_0 a t_n , seja o problema de otimização (3.33) denominado por PO_1 , seja a função objetivo minimizar perdas (3.13) utilizada em PO_1 e seja L_{cont} a lista das contingências a serem analisadas durante o período de tempo considerado. O fluxograma da figura 3.12 apresenta os passos, a serem realizados, para determinar a sequência de ações de controle durante o período de tempo considerado.

Figura 3.12: Sequência de passos para determinação da sequência das ações de controle para o planejamento da operação do SEP

O algoritmo abaixo descreve a sequência de passos para determinar as ações de controle durante o período de tempo.

PASSO 1.1 – Definir a lista de contingências do SEP (L_{cont}).

PASSO 1.2 – Adotar o primeiro instante de tempo ($p = 0$) para iniciar o planejamento da operação do SEP.

PASSO 1.3 – Especificar, com base nos dados de demanda do SEP, as potências ativas e reativas (S_0) nas barras do SEP no instante de tempo t_p . Especificar, com base na curva de carga horária do SEP, as potências ativas e reativas (S_1) nas barras do SEP no instante de tempo t_{p+1} . Especificar as potências ativas e reativas (S_2) nas barras do SEP, de modo a garantir que as margens de estabilidade de tensão sejam, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado $MET_{especificada}^{minima}$.

PASSO 1.4 – Resolver o problema de otimização PO_1 e determinar as ações de controle para o intervalo de tempo (t_p, t_{p+1}) .

PASSO 1.5 – Verificar convergência do problema PO_1 , se PO_1 convergiu, então siga para PASSO 1.6, senão siga para PASSO 2.0

PASSO 1.6 – Aplicar ações de controle no tempo t_p definidas por PO_1 .

PASSO 1.7 – Verificar se todo período de tempo considerado foi analisado, se todo período de tempo foi analisado, siga para o PASSO 1.9, senão siga para o PASSO 1.8.

PASSO 1.8 – Fazer $p = p + 1$ e retornar ao PASSO 1.3, para analisar o próximo intervalo de tempo.

PASSO 1.9 – O sistema foi analisado durante o período de tempo considerado e durante este período o SEP pode operar de forma segura com as ações de controle previamente determinadas, isto é, foi possível determinar ações de controle de modo a não ocorrer violações das restrições operacionais, de demanda e de segurança, considerando-se o caso base e a lista de contingências.

PASSO 2 – Não foi possível determinar ações de controle de modo que não ocorressem violações nas restrições do SEP, ou o problema PO_1 apresentou problemas numéricos em sua

resolução e não foi possível determinar uma solução. O SEP pode operar de forma segura até o instante de tempo t_p com as ações de controle previamente determinadas.

Seguindo os passos descritos no fluxograma é possível determinar a sequência de ações de controle que mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos ou até o último intervalo de tempo ou até que o problema não apresente solução.

Caso o problema não apresente solução, este pode não ter apresentado solução por dois motivos, ou a resolução do problema apresentou problemas numéricos, ou não existem ações de controle que satisfaçam os requisitos operacionais do SEP, simultaneamente, para o caso base e a lista de contingências.

Considere que o problema de otimização PO_1 não tenha convergido devido à inexistência de ações de controle que satisfizessem todos os requisitos operacionais do SEP, simultaneamente para o caso base e a lista de contingências.

Sendo assim, existem duas alternativas para o operador do SEP. A primeira alternativa é realizar o corte de carga em determinadas barras do SEP, gerando prejuízos econômicos, tanto para a parte fornecedora de energia elétrica, quanto para o consumidor. Alternativa é evitar o corte de carga e minimizar o risco operacional do SEP, satisfazendo os requisitos operacionais para o caso base e o maior número possível de contingências e fornecer medidas de controle emergenciais para as contingências críticas.

Neste trabalho, optou-se por continuar o planejamento da operação minimizando o risco operacional do sistema. Portanto, torna-se necessário identificar qual a contingência crítica do SEP e para qual valor de carregamento ela se torna crítica, impedindo a convergência do problema PO_1 . Em face ao exposto, é proposta, neste trabalho, uma metodologia para identificar as contingências críticas do SEP e os valores de carregamento em que estas se tornam críticas, essa metodologia é apresentada na seção 3.5.

3.5. Metodologia para identificação das contingências críticas do SEP

Essa seção apresenta a segunda contribuição desta dissertação, a qual consiste em fornecer uma metodologia para determinar as contingências críticas de um SEP.

Pode ser observado, no fluxograma da figura 3.12, que, em determinado nível de carregamento, o problema de otimização PO_1 pode não apresentar solução. Consideremos que

a não convergência de PO_1 não está relacionada a problemas numéricos e, portanto, em determinado nível de carregamento é impossível encontrar ações de controle para manter o SEP no estado de operação normal e seguro, isto é, em determinado momento o operador é incapaz de aplicar ações de controle ao SEP para manter os requisitos operacionais satisfeitos, simultaneamente, para o caso base e a lista de contingências. Seja S_s este nível de carregamento e, portanto, a partir do nível de carregamento S_s o corte de carga seria a única forma para manter o SEP operando no estado normal e seguro.

Porém, a fim de evitar o corte de carga no SEP, considere como prioridade do operador do sistema manter todas as restrições operacionais, de demanda e de segurança satisfeitas para o caso base e também manter todas as restrições operacionais, de demanda e de segurança satisfeitas para o maior número de contingências possível. Sendo assim, é necessário a priori, determinar quais as contingências e quais os fatores que estejam impossibilitando a convergência do problema PO_1 . A não convergência do problema PO_1 pode estar relacionada com os seguintes fatores:

- Não existem ações de controle que mantenham todas as tensões nas barras dentro da região factível.
- Não existem ações de controle que mantenham as potências reativas, nas barras de geração, dentro de seus limites.
- Não existem ações de controle capazes de manter o balanço de potência no sistema em S_2 , isto é, a margem de estabilidade de tensão é menor que o valor mínimo de segurança especificado.

Sendo assim, foi proposta, nesta dissertação, uma metodologia para identificação das contingências críticas e os valores de carregamento em que estas se tornam críticas, esta metodologia foi realizada em duas etapas. A primeira etapa consiste em resolver um problema de otimização, o qual determina as ações de controle e o máximo valor de carregamento em que é possível manter os requisitos operacionais do SEP satisfeitos, inclusive a restrição de MET mínima de segurança, simultaneamente para o caso base e a lista de contingências. Esta formulação é apresentada na subseção 3.5.1.

3.5.1. Formulação para a determinação das ações de controle e do valor máximo de carregamento (1ª Etapa da metodologia para identificação das contingências críticas)

Conforme mencionado, a metodologia para identificação das contingências críticas é realizada em duas etapas. A primeira etapa consiste em resolver o problema de otimização (3.38), denominado por PO_2 . O objetivo em resolver este problema foi o de determinar as ações de controle e o maior valor de carregamento em que é possível satisfazer os requisitos operacionais do SEP, inclusive a restrição de MET mínima de segurança, simultaneamente para o caso base e a lista de contingências.

Nesta formulação, as potências ativas e reativas das barras de carga e as potências ativas das barras PV do SEP foram parametrizadas em função das potências ativas e reativas iniciais das barras de carga e potências ativas iniciais nas barras PV através da variável λ .

$$S_1^k = \lambda * (P_0^k + j Q_0^k) \quad \forall k \in \Omega_{PQ} \quad (3.34)$$

$$S_1^k = \lambda * P_0^k \quad \forall k \in \Omega_{PV} \quad (3.35)$$

Novamente, para garantir que as MET sejam, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado, foi necessária a avaliação do SEP nas potências especificadas correspondentes ao valor da MET mínima de segurança S_2 (3.36 - 3.37).

$$S_2^k = \lambda * (P_0^k + j Q_0^k) * \left(1 + \frac{MET_{especificada}^{minima}(\%)}{100} \right) \quad \forall k \in \Omega_{PQ} \quad (3.36)$$

$$S_2^k = \lambda * P_0^k * \left(1 + \frac{MET_{especificada}^{minima}(\%)}{100} \right) \quad \forall k \in \Omega_{PV} \quad (3.37)$$

A resolução do problema de otimização PO_2 avalia o SEP em dois níveis de carregamento, o primeiro nível é utilizado para garantir que todas as restrições operacionais e de demanda sejam satisfeitas em S_1 e o segundo nível é utilizado para garantir que as MET sejam, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado, quando comparadas às potências especificadas no primeiro nível. Neste problema, inicialmente, são considerados o caso base e a lista inicial de contingências e a maximização da variável λ é a função objetivo $f(x)$ do problema.

Em resumo, a resolução do problema PO_2 determina as ações de controle que maximizam a margem de carregamento do SEP, através da variável λ , de modo que, no ponto de máximo carregamento do sistema, são satisfeitas as restrições operacionais, de demanda, de segurança e de MET mínima de segurança. O problema de otimização PO_2 é dado por,

$$\begin{aligned}
& \max \lambda \\
& \text{Sujeito à} \\
& V_g^{\min} \leq V_g \leq V_g^{\max} \quad \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\} \\
& V_m^{\min} \leq V_m^{i,j} \leq V_m^{\max} \quad \forall m \in \Omega_{PQ}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 1 \\
& t_{km}^{\min} \leq t_{km} \leq t_{km}^{\max} \quad \forall k, m \in T \\
& Bsh_k^{\min} \leq Bsh_k \leq Bsh_k^{\max} \quad \forall k \in B \\
& Q_{G_k}^{\min} \leq Q_G^{k,i,j}(V, \theta, t_{km}) \leq Q_{G_k}^{\max} \\
& \forall k \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, \quad i = 0, \dots, n_{NC}, \quad j = 1, 2 \\
& \lambda * P_k^0 - \sum_{m \in \Omega_{mk}} P_{km}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gk}} P_{kg}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{kg}) = 0 \\
& \forall k, m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 1 \\
& \lambda * P_G^0 - \sum_{m \in \Omega_{mG}} P_{Gm}^{i,j}(V_G, \theta_G^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gG}} P_{Gg}^{i,j}(V_G, \theta_G^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{Gg}) = 0 \\
& \forall m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall G \in \{\Omega_{PV}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 1 \quad (3.38) \\
& \lambda * Q_k^0 + Q_k^{sh}(V_k^{i,j}) - \sum_{m \in \Omega_{mk}} Q_{km}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \dots \\
& \dots - \sum_{g \in \Omega_{gk}} Q_{kg}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{kg}) = 0 \\
& \forall m, k \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 1 \\
& \lambda * \left(1 + \frac{MET_{especificada}^{minima}(\%)}{100}\right) * P_k^0 - \sum_{m \in \Omega_{mk}} P_{km}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \dots \\
& \dots - \sum_{g \in \Omega_{gk}} P_{kg}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{kg}) = 0 \\
& \forall k, m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \lambda * \left(1 + \frac{MET_{especificada}^{minima}(\%)}{100} \right) * P_G^0 - \sum_{m \in \Omega_{mG}} P_{Gm}^{i,j}(V_G, \theta_G^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \dots \\
& \dots - \sum_{g \in \Omega_{gG}} P_{Gg}^{i,j}(V_G, \theta_G^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{Gg}) = 0 \\
& \forall m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall G \in \{\Omega_{PV}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 2 \\
& \lambda * \left(1 + \frac{MET_{especificada}^{minima}(\%)}{100} \right) * Q_k^0 + Q_k^{sh}(V_k^{i,j}) - \sum_{m \in \Omega_{mk}} Q_{km}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \dots \\
& \dots - \sum_{g \in \Omega_{gk}} Q_{kg}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{kg}) = 0 \\
& \forall m, k \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 2
\end{aligned} \tag{3.38}$$

Após a resolução do problema PO_2 , a segunda etapa é realizada, esta etapa é apresentada na subseção seguinte.

3.5.2. Identificação da contingência crítica (2º Etapa)

A segunda etapa consiste em, utilizando o resultado encontrado na primeira etapa, identificar a contingência crítica. Neste trabalho, foram propostos dois modos para identificar a contingência crítica do sistema. O primeiro modo consiste em analisar os valores das variáveis de folga do problema otimizado na primeira etapa. As variáveis de folga encontram-se calculadas ao final da resolução do problema PO_2 e elas possuem informações sobre as variáveis e as grandezas do SEP em relação à proximidade de violações nas restrições operacionais, tornando a metodologia para identificação da contingência crítica mais eficiente para ser aplicada em tempo real comparada a resolução de diversos fluxos de carga continuado.

O segundo modo consiste em, com as ações de controles determinadas no problema otimizado da primeira etapa, realizar o fluxo de carga continuado para todas as contingências. O inconveniente deste modo é o tempo gasto para identificar a contingência crítica. A vantagem deste modo é conseguir identificar a contingência crítica quando o problema está relacionado com a MET no caso de uma bifurcação sela-nó, isto é, para os casos em que a MET coincide com o PMC do SEP.

Nesta etapa, para determinar a contingência crítica, devem ser observadas para quais contingências as restrições de tensão estarão no limite de serem violadas no ponto de

operação S_1 e/ou quais as restrições de potência reativa gerada estarão no limite de serem violadas no ponto de operação S_2 e/ou quais contingências apresentam MET próximas ao valor mínimo de segurança especificado.

A figura 3.13 mostra os três fatores que impossibilitam o aumento da demanda do SEP.

Figura 3.13: Fatores que impossibilitam o aumento na demanda do SEP

O gráfico à esquerda, da figura 3.15, mostra que o fator limitante para o aumento na demanda do SEP pode estar relacionado com a MET, isto é, a partir de S_2 não é mais possível fechar o balanço de potência no sistema. O gráfico ao meio, da figura 3.15, mostra que a violação no limite de tensão em S_1 , para alguma contingência, torna-se o fator limitante e impede o aumento na demanda do sistema sem que exista violação nas restrições de tensão. No gráfico à direita, a geração de potência reativa do gerador k do SEP encontra-se no limite para alguma das contingências. Essas são as três possibilidades que impedem o aumento na demanda do sistema considerando as restrições utilizadas no problema PO_2 . Cabe salientar que, se fossem utilizadas outras restrições, tais como: limite superior de corrente nas linhas de transmissão ou limite de carregamento nos equipamentos do sistema, analogamente, estes deveriam ser analisados do mesmo modo que a geração de potência reativa nos geradores do SEP.

Através dos valores das variáveis de folga e/ou do resultado do fluxo de carga continuado, obtém-se uma indicação da contingência crítica do SEP.

Para identificar a contingência crítica através da análise das variáveis de folga, utilizadas no método de otimização primal-dual de pontos interiores, considere que para cada

restrição de desigualdade ($h_j(x)$) está associada uma variável de folga (s_j) com $j \in \mathbb{R}^{n_{RD}}$. As adições das variáveis de folga nas restrições de desigualdade transformam as n_{RD} restrições de desigualdade em restrições de igualdade. Por simplicidade, considere, como exemplo, que a restrição de desigualdade h_j dependa somente do valor do estado x_j , o qual possui limites inferior e superior x_j^{min} e x_j^{max} , respectivamente. As restrições de desigualdade inferior e superior para esse estado são dadas por (3.39) e (3.42), respectivamente.

$$h_j^{inf} = -x_j + x_j^{min} \leq 0 \quad (3.39)$$

$$h_j^{sup} = x_j - x_j^{max} \leq 0 \quad (3.40)$$

Para cada restrição (h_j) deve ser adicionada uma variável de folga (s_j), assim temos,

$$-x_j + x_j^{min} + s_j^{inf} = 0 \quad (3.41)$$

$$x_j - x_j^{max} + s_j^{sup} = 0 \quad (3.42)$$

Note que, se o estado x_j está dentro da região factível, os valores das variáveis de folgas s_j^{inf} e s_j^{sup} são estritamente positivos e quanto mais próximo o estado esteja do limite, menor é o valor da variável de folga associada. Portanto, para determinar a contingência crítica, através da análise das variáveis de folga, devem-se verificar quais as variáveis de folga encontram-se mais próximas do valor zero. Cabe salientar que, os valores que devem ser analisados através das variáveis de folga, são os valores associadas aos estados e as grandezas que impedem o aumento na demanda do sistema, estes valores estão associados aos limites inferiores de tensão no valor de carregamento S_1 e os limites superiores de potência reativa gerada no valor de carregamento S_2 determinados na resolução do problema PO_2 .

A análise dos valores das variáveis de folga é capaz de fornecer uma indicação da contingência crítica quando o problema está relacionado à violação do limite de tensão e de potência reativa gerada. Contudo, a análise das variáveis de folga não é capaz de identificar a contingência crítica quando o problema está relacionado com a MET no caso de uma bifurcação sela-nó, pois as variáveis de folga não possuem informações relacionadas ao PMC do SEP.

A identificação da contingência crítica através do fluxo de carga continuado é feita realizando um fluxo de carga continuado para cada contingência da lista e verificando, novamente, se alguma restrição de tensão está no limiar de ser violada no valor de carregamento S_1 , ou se alguma restrição de geração de potência reativa está no limiar de ser

violada no valor de carregamento S_2 e/ou se a MET coincide com o PMC do sistema no valor de carregamento S_2 .

Cabe salientar que, a principal contribuição na metodologia para identificar as contingências críticas, nesta dissertação, está relacionada com a formulação e resolução do problema PO_2 , a qual determina as ações de controle e o valor máximo de carregamento em que os requisitos operacionais são satisfeitos. Existem outros métodos que podem ser utilizados para verificar a proximidade do SEP ao colapso de tensão, quando este está relacionado a uma BSN, como, por exemplo, a análise dos autovalores da matriz Jacobiana.

À medida que as contingências críticas forem identificadas na segunda etapa, estas são excluídas da lista de contingências e a metodologia é repetida resolvendo-se novamente o problema PO_2 e identificando-se a próxima contingência crítica. A metodologia é repetida até que o valor de máximo carregamento determinado por PO_2 seja maior que o valor máximo de carregamento do SEP ao longo do dia.

Sem perda de generalidade, como o comportamento da demanda do SEP ao longo dia é conhecido, as contingências críticas e os valores dos carregamentos em que estas se tornam críticas podem ser obtidos no início do planejamento da operação do SEP. Para isto, considere um SEP e que no início da operação as potências especificadas nas barras sejam S_0 , onde S_0 é um vetor composto das potências ativas e reativas iniciais das barras de carga e potências ativas iniciais nas barras PV do sistema e, por simplicidade, considere que não existam contingências críticas no SEP em S_0 .

O fluxograma da figura 3.14 ilustra o procedimento para identificação das contingências críticas e dos valores de carregamento em que elas se tornam críticas.

Figura 3.14: Sequência de passos para identificação das contingências críticas e dos valores de carregamento em que estas se tornam críticas

O algoritmo abaixo descreve a sequência de passos que devem ser realizados para identificar as contingências críticas e os respectivos valores de carregamento em que elas se tornam críticas.

PASSO 1.1 – Especificar o máximo valor de carregamento (S_{max}) do SEP ao longo do dia

PASSO 1.2 – Definir a lista inicial de contingências L_{cont}^0

PASSO 1.3 – Criar lista inicial de contingências críticas L_{CC}^0

PASSO 1.4 – Definir a lista de contingências que serão analisadas no problema de otimização PO_2

PASSO 1.5 – Resolver o problema de otimização PO_2 com a lista de contingências analisadas, determinando as ações de controle e o valor de máximo carregamento em que é possível satisfazer os requisitos operacionais do SEP, simultaneamente, para o caso base e a lista de contingências.

PASSO 1.6 – Verificar se o valor de máximo carregamento (S_{max}) do SEP, ao longo do dia, é menor que o valor de máximo carregamento ($\lambda_{max} * S_0$) obtido na resolução de PO_2 . Se for menor, então siga para o PASSO 1.11, senão siga para o PASSO 1.7

PASSO 1.7 – Realizar a identificação da contingência crítica (CC_i) através da análise das variáveis de folga, ou através do resultado do FCC

PASSO 1.8 – Fazer $p = p + 1$, identificando a p contingência crítica da lista de contingências críticas

PASSO 1.9 – Adicionar informações da contingência crítica p à lista de contingências críticas

PASSO 1.10 – Retirar a contingência crítica da lista de contingências L_{cont} e retornar ao PASSO 1.4 para identificar a próxima contingência crítica

PASSO 1.11 – O valor de máximo carregamento (S_{max}) do SEP, ao longo do dia, é menor que o valor de máximo carregamento ($\lambda_{max} * S_0$) obtido na resolução de PO_2 . Portanto, neste dia, não existirão mais contingências críticas no SEP, além das contingências críticas da lista L_{CC} . O SEP pode operar de forma segura até o valor de carregamento da primeira contingência crítica λ_{CC}^1 .

Após a identificação das contingências críticas e dos valores de carregamento em que estas se tornam críticas, o operador do sistema pode planejar a operação do SEP, ao longo do dia, determinando uma sequência de ações de controle que mantém o sistema com menor

risco operacional, minimizando as perdas nas linhas de transmissão e fornecer medidas de controle emergenciais para as contingências críticas do SEP.

3.6. Planejamento da operação de um SEP minimizando as perdas nas linhas de transmissão e o risco operacional do sistema

Na seção 3.4 foi apresentada a formulação (PO_1) para determinar as ações de controle que minimizam as perdas nas linhas de transmissão e mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos, inclusive as restrições de MET mínima de segurança, simultaneamente para o caso base e a lista de contingências. Na seção 3.4.1 foi apresentado o planejamento da operação, o qual consiste em resolver o problema de otimização PO_1 para todos os intervalos de potências especificados pelo operador do SEP, obtendo-se uma sequência de ações de controle que minimizam as perdas nas linhas de transmissão e mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos. No fluxograma apresentado na figura 3.12, vimos que em determinado nível de carregamento o problema de otimização PO_1 pode não apresentar solução. Na seção 3.5 foi apresentada a metodologia para identificação das contingências críticas do SEP e do valor de carregamento em que estas se tornam críticas.

Em face ao exposto, o operador do SEP pode continuar com o planejamento da operação minimizando o risco operacional do sistema, minimizando as perdas nas linhas de transmissão e mantendo os requisitos operacionais do SEP satisfeitos, inclusive a restrição de MET mínima de segurança, para o caso base e para o maior número de contingências possível, indicando medidas de controle emergenciais para as contingências críticas do SEP. Cabe salientar que, neste trabalho, todas as variáveis foram consideradas contínuas, podendo assumir qualquer valor dentro de um intervalo de valores especificados.

Para continuar com o planejamento da operação, considere, novamente, que o período de tempo de interesse, definido pelo operador, seja o intervalo de t_0 a t_n , seja $S_{min} = S(t_0)$ o menor valor da demanda e $S_{max} = S(t_n)$ o maior valor da demanda ao longo do dia. Segundo a primeira estratégia, realiza-se a divisão desse período em n intervalos de tempo, sendo que para cada instante de tempo t_p está associada uma potência $S(t_p)$. Conforme a segunda estratégia, para cada intervalo de tempo, associam-se três valores de potência, os quais estão associados aos níveis de carregamento nos dois instantes de tempo do intervalo $S_0(t_p)$ e $S_1(t_{p+1})$ e ao nível de carregamento correspondente a MET mínima de segurança especificada $S_2(S_1)$.

A tabela 3.1 ilustra a metodologia para realizar discretização da curva de carga horária, utilizando as duas estratégias mencionadas, onde o índice p representa o instante de tempo e o nível de carregamento do SEP.

Tabela 3.1: Metodologia da divisão do período de análise e avaliação do SEP em três níveis de carregamento

p	$S_0(t_p)$	$S_1(t_{p+1})$	$S_2(S_1)$
0	$S_0(t_0)$	$S_1(t_1)$	$S_2(S_1)$
1	$S_0(t_1)$	$S_1(t_2)$	$S_2(S_1)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$n - 1$	$S_0(t_{n-1})$	$S_1(t_n)$	$S_2(S_1)$

Simultaneamente com a discretização da curva de carga horária, define-se a lista inicial de contingências ($L_{cont}^0 = L_{cont}$) que serão analisadas no problema. Por simplicidade, considere que no primeiro instante de tempo não existem contingências críticas no SEP, e, portanto, a lista de contingências críticas (L_{CC}) está vazia.

Conforme mencionado, as contingências críticas podem ser identificadas logo no início da operação do SEP, conforme a metodologia apresentada na seção anterior, onde são obtidas quais são as contingências críticas e quais os valores de carregamento em que estas se tornam críticas (Tabela 3.2), ou podem ser identificadas durante a operação do SEP, a cada intervalo de tempo em que não é possível resolver o problema PO_1 .

Tabela 3.2: Lista de contingências críticas

j	ID	λ_{max}
1	CC_1	$\lambda_{max}^1(PO_2)$
2	CC_2	$\lambda_{max}^2(PO_2)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
n_{CC}	$CC_{n_{CC}}$	$\lambda_{max}^{n_{CC}}(PO_2)$

O fluxograma da figura 3.15 apresenta a sequência dos passos a serem realizados para planejar a operação do SEP, ao longo do dia, com identificação das contingências críticas

durante a operação do SEP, determinando a sequência das ações de controle, a fim de garantir que o SEP esteja o mais seguro possível e o corte de carga seja evitado.

Figura 3.15: Planejamento da operação para manter o SEP com o menor risco operacional

O algoritmo abaixo descreve a sequência de passos para determinar a sequência de ações de controle para manter o SEP com o menor risco operacional.

PASSO 1.1 – Definir a lista de contingências do SEP (L_{cont}).

PASSO 1.2 – Adotar $h = 0$ e o primeiro instante de tempo ($p = 0$) para iniciar o planejamento da operação do SEP.

PASSO 1.3 – Especificar, com base nos dados de demanda do SEP, as potências ativas e reativas (S_0) nas barras do SEP no instante de tempo t_p . Especificar, com base na curva de carga horária do SEP, as potências ativas e reativas (S_1) nas barras do SEP no instante de tempo t_{p+1} . Especificar as potências ativas e reativas (S_2) nas barras do SEP, de modo a garantir que as margens de estabilidade de tensão sejam, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado $MET_{especificada}^{minima}$.

PASSO 1.4 – Resolver o problema de otimização PO_1 e determinar as ações de controle para o intervalo de tempo (t_p, t_{p+1}) .

PASSO 1.5 – Verificar convergência do problema PO_1 , se PO_1 convergiu, então siga para PASSO 1.6, senão siga para PASSO 2.0

PASSO 1.6 – Aplicar ações de controle no tempo t_p definidas por PO_1 .

PASSO 1.7 – Verificar se todo período de tempo considerado foi analisado, se todo período de tempo foi analisado, siga para o PASSO 1.9, senão siga para o PASSO 1.8.

PASSO 1.8 – Fazer $p = p + 1$ e retornar ao PASSO 1.3, para analisar o próximo intervalo de tempo.

PASSO 1.9 – Verificar se a lista de contingência inicial (L_{cont}^0) é igual à lista de contingências no intervalo de tempo final do período de tempo (L_{cont}). Se as listas de contingências forem iguais, siga para o PASSO 1.12, senão siga para o PASSO 1.10.

PASSO 1.10 – O sistema foi analisado durante o período de tempo especificado, porém não foi possível manter os requisitos operacionais do SEP satisfeitos para todas as contingências. O SEP pode operar de forma segura até o intervalo de tempo (t_{z-1}, t_z) , a partir do instante de tempo t_z o SEP foi mantido com o menor risco operacional, onde os requisitos operacionais do sistema foram satisfeitos para o caso base e o maior número de contingências possível. Exibir relatório contendo informações sobre as contingências críticas e os níveis de carregamento em que elas se tornaram críticas.

PASSO 1.12 – O sistema foi analisado durante o período de tempo considerado e durante este período o SEP esteve no estado normal seguro, isto é, foi possível determinar ações de controle de modo a não ocorrer violações das restrições operacionais, de demanda e de segurança, considerando-se o caso base e a lista de contingências.

PASSO 2.0 – Não foi possível resolver o problema de otimização PO_1 analisando as contingências da lista L_{cont} e, portanto, não foi possível determinar ações de controle que satisfizessem os requisitos operacionais do SEP, simultaneamente, para o caso base e a lista L_{cont} . Resolver o problema de otimização PO_2 , com a lista de contingências L_{cont} , a fim de determinar as ações de controle que maximizam a margem de carregamento λ_{max} do SEP.

PASSO 2.1 – Determinar a contingência crítica (CC_i) e o tipo de restrição violada, através do FCC ou analisando as variáveis de folga, com o resultado do problema de otimização PO_2 .

PASSO 2.2 – Verificar, através do valor da variável h , se a contingência CC_i é a primeira contingência crítica do SEP ($h = 0$). Se a contingência CC_i for a primeira contingência crítica, siga para o PASSO 2.3, senão siga para o PASSO 2.4

PASSO 2.3 – Fazer $z = p$, a fim de identificar o primeiro intervalo de tempo a apresentar contingência crítica.

PASSO 2.4 – Fazer $h = h + 1$. Armazenar informações na lista de contingência críticas L_{CC}^h sobre a contingência crítica CC_i e o valor de carregamento em que ela se torna crítica ($\lambda_{CC}^h = \lambda_{max}$).

PASSO 2.5 – Atualizar a lista de contingências retirando a contingência crítica CC_i da lista de contingências L_{cont} . Retornar ao PASSO 1.4 com a lista de contingências atualizada para resolver, novamente, o problema de otimização PO_1

Nesta seção, foi apresentada uma metodologia para o planejamento da operação de um SEP. Nesta metodologia, foi utilizada a estratégia da divisão do período de análise em intervalos de tempo e de potência, e, assim, foram determinadas as ações de controle que minimizam as perdas nas linhas de transmissão em cada intervalo de potência através da resolução do problema PO_1 proposto. A convergência do problema PO_1 garante que todos os requisitos operacionais do SEP, inclusive as restrições de MET mínima de segurança, sejam satisfeitos dentro do intervalo de potência especificado. Quando não for possível obter solução para o problema PO_1 , as contingências críticas do sistema devem ser identificadas e

excluídas do problema, a fim de garantir que o sistema opere o mais seguro possível e o corte de carga seja evitado. O procedimento deve ser realizado até o intervalo de potência final e desta forma obtém-se a sequência de ações de controle ao longo do dia.

Conforme mencionado, nesta dissertação, foram propostos dois objetivos distintos para serem minimizados ou maximizados na resolução dos problemas de otimização propostos, a fim de realizar o planejamento da operação do SEP. O planejamento da operação, cujo objetivo foi minimizar as perdas nas linhas de transmissão, foi apresentado nas seções anteriores. A seção 3.7 apresenta a formulação do problema de otimização, cujo objetivo é maximizar a margem de carregamento do SEP, a fim de minimizar o número de vezes em que as ações de controle são modificadas ao longo do dia.

3.7. Formulação para o problema de determinação das ações de controle de um SEP considerando um intervalo de acréscimo de carga $S_0 + \Delta S$ e a MET avaliando o caso base e a lista de contingências maximizando a margem de carregamento

Esta seção apresenta a terceira principal contribuição desta dissertação, a qual está relacionada com uma formulação alternativa à apresentada na seção 3.4, cujo objetivo é minimizar, indiretamente, o número de vezes em que as ações de controle são modificadas ao longo do dia.

No problema de otimização PO_1 , os três níveis de carregamento do SEP foram previamente especificados. Nesta nova formulação, denominada por PO_3 , o SEP também será avaliado em três níveis de carregamento (segunda estratégia), satisfazendo as mesmas restrições de PO_1 . Porém, somente o primeiro nível de carregamento do SEP é previamente especificado, sendo que os outros dois níveis de carregamento são determinados através da resolução do problema em conjunto com as ações de controle.

O objetivo desta formulação é determinar as ações de controle que maximizam a margem de carregamento do SEP e mantêm o SEP dentro da região factível de operação, incluindo as restrições de MET mínima de segurança, para o maior acréscimo de carga possível. Na medida em que os requisitos operacionais do SEP são mantidos satisfeitos para o maior acréscimo de carga, o número de vezes que as ações de controle são modificadas é indiretamente minimizado, em conjunto com os desgastes nos dispositivos controlados do SEP e os custos relacionados à manutenção destes dispositivos.

Para formular este problema, especificam-se as potências iniciais S_0 do SEP e parametriza-se o crescimento na demanda do sistema em função das potências iniciais através da variável λ . Novamente, para que os requisitos operacionais do SEP sejam todos satisfeitos, o SEP deve ser avaliado em três níveis de carregamento S_0 , S_1 e S_2 , cujos níveis de carregamento são dados por (3.43).

$$\begin{aligned} S_0 &= S_0 \\ S_1 &= \lambda * S_0 \\ S_2 &= \lambda * \left(1 + \frac{MET_{segurança}^{mínima}(\%)}{100}\right) * S_0 \end{aligned} \quad (3.43)$$

Representando pelo índice $j = 0, 1$ e 2 as variáveis e as grandezas do SEP nos três níveis de carregamento, cujas potências especificadas são S_0 , S_1 e S_2 , respectivamente, a formulação deste problema de otimização (PO₃) é dada por,

$$\begin{aligned} & \max \lambda \\ & \text{Sujeito à} \\ & V_g^{min} \leq V_g \leq V_g^{max} \quad \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\} \\ & V_m^{min} \leq V_m^{i,j} \leq V_m^{max} \quad \forall m \in \Omega_{PQ}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 0, 1 \\ & t_{km}^{min} \leq t_{km} \leq t_{km}^{max} \quad \forall k, m \in T \\ & Bsh_k^{min} \leq Bsh_k \leq Bsh_k^{max} \quad \forall k \in B \\ & Q_{G_k}^{min} \leq Q_G^{k,i,j}(V, \theta, t_{km}) \leq Q_{G_k}^{max} \\ & \forall k \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, \quad i = 0, \dots, n_{NC}, \quad j = 0, 1, 2 \\ & P_k^0 - \sum_{m \in \Omega_{mk}} P_{km}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gk}} P_{kg}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{kg}) = 0 \\ & \forall k, m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 0 \\ & P_G^0 - \sum_{m \in \Omega_{mG}} P_{Gm}^{i,j}(V_G, \theta_G^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gG}} P_{Gg}^{i,j}(V_G, \theta_G^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{Gg}) = 0 \\ & \forall m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall G \in \{\Omega_{PV}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 0 \end{aligned} \quad (3.44)$$

$$\begin{aligned}
& Q_k^0 + Q_k^{sh}(V_k^{i,j}) - \sum_{m \in \Omega_{mk}} Q_{km}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \dots \\
& \dots - \sum_{g \in \Omega_{gk}} Q_{kg}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{kg}) = 0 \\
& \forall m, k \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 0 \\
& \lambda * P_k^0 - \sum_{m \in \Omega_{mk}} P_{km}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gk}} P_{kg}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{kg}) = 0 \\
& \forall k, m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 1 \\
& \lambda * P_G^0 - \sum_{m \in \Omega_{mG}} P_{Gm}^{i,j}(V_G, \theta_G^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \sum_{g \in \Omega_{gG}} P_{Gg}^{i,j}(V_G, \theta_G^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{Gg}) = 0 \\
& \forall m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall G \in \{\Omega_{PV}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 1 \\
& \lambda * Q_k^0 + Q_k^{sh}(V_k^{i,j}) - \sum_{m \in \Omega_{mk}} Q_{km}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \dots \\
& \dots - \sum_{g \in \Omega_{gk}} Q_{kg}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{kg}) = 0 \quad (3.44) \\
& \forall m, k \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 1 \\
& \lambda * \left(1 + \frac{MET_{especificada}^{minima}(\%)}{100}\right) * P_k^0 - \sum_{m \in \Omega_{mk}} P_{km}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \dots \\
& \dots - \sum_{g \in \Omega_{gk}} P_{kg}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{kg}) = 0 \\
& \forall k, m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 2 \\
& \lambda * \left(1 + \frac{MET_{especificada}^{minima}(\%)}{100}\right) * P_G^0 - \sum_{m \in \Omega_{mG}} P_{Gm}^{i,j}(V_G, \theta_G^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \dots \\
& \dots - \sum_{g \in \Omega_{gG}} P_{Gg}^{i,j}(V_G, \theta_G^{i,j}, V_g, \theta_g^{i,j}, t_{Gg}) = 0 \\
& \forall m \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall G \in \{\Omega_{PV}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 2
\end{aligned}$$

$$\lambda * \left(1 + \frac{MET_{especificada}^{minima}(\%)}{100} \right) * Q_k^0 + Q_k^{sh}(V_k^{i,j}) - \sum_{m \in \Omega_{mk}} Q_{km}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_m^{i,j}, \theta_m^{i,j}, t_{km}) - \dots$$

$$\dots - \sum_{g \in \Omega_{gk}} Q_{kg}^{i,j}(V_k^{i,j}, \theta_k^{i,j}, V_g^{i,j}, \theta_g^{i,j}, t_{kg}) = 0 \quad (3.44)$$

$$\forall m, k \in \{\Omega_{PQ}\}, \forall g \in \{\Omega_{PV}, \Omega_{\theta V}\}, i = 0, \dots, n_{NC}, j = 2$$

A resolução do problema PO_3 determina as ações de controle que maximizam a margem de carregamento $S_1 = \lambda * S_0$ do SEP, encontrando o valor máximo de carregamento λ_{max} em que é possível manter todos os requisitos operacionais satisfeitos de S_0 a S_1 , inclusive as restrições de MET mínima de segurança, simultaneamente para o caso base a lista de contingências. Resolvendo o problema PO_3 repetidas vezes, o operador do SEP pode planejar a operação do sistema, determinando a sequência de ações de controle que maximizam a margem de carregamento do sistema, minimizando, implicitamente, as alterações nas ações de controle, ao longo do dia, e os custos relativos à manutenção dos dispositivos controlados.

3.7.1. Planejamento da operação de um SEP maximizando a margem de carregamento e minimizando as modificações nas ações de controle

Considere que o problema de otimização PO_3 , proposto na seção anterior, somente seja resolvido enquanto existirem ações de controle que maximizem a demanda do sistema mantendo os requisitos operacionais do sistema satisfeitos para o caso base e a lista inicial de contingências. A metodologia de identificação e exclusão das contingências críticas poderia ser utilizada, mas, quando o SEP se encontra altamente carregado, muitas contingências tornam-se críticas e o intervalo de tempo, correspondente aos valores de carregamentos máximos determinados na resolução do problema PO_3 , torna-se muito pequeno, inviabilizando as alterações nas ações de controle entre um intervalo e outro.

Seja S_{max} o valor do máximo carregamento do SEP ao longo do dia e S_0 as potências especificadas nas barras no início da operação, onde S_0 é um vetor composto das potências ativas e reativas iniciais das barras de carga e potência ativas iniciais nas barras PV do sistema. Seja também L_{cont} a lista inicial de contingências.

O fluxograma apresentado na figura 3.16 mostra a sequência de passos que devem ser realizados para determinar a sequência de ações de controle do SEP, que maximizam a margem de carregamento do sistema.

Figura 3.16: Planejamento da operação do SEP minimizando as modificações nas ações de controle

O algoritmo abaixo descreve a sequência de passos para determinar sequência de ações de controle para o planejamento da operação que minimiza as modificações nas ações de controle.

PASSO 1.1 – Adotar $p = 1$ e determinar o valor de carregamento inicial ($\lambda = 1$).

PASSO 1.2 – Especificar as potências ativas e reativas do SEP no valor de carregamento λ ($S_0 = \lambda * S_0$).

PASSO 1.3 – Resolver o problema de otimização PO_3 , obtendo as ações de controle que maximizam a margem de carregamento do SEP e o valor da máxima margem de carregamento λ_{max}^p .

PASSO 1.4 – Verificar convergência do problema PO_3 , se PO_3 convergiu, então siga para PASSO 1.5, senão siga para PASSO 1.10.

PASSO 1.5 – Aplicar ações de controle definidas por PO_3 quando o valor do carregamento for S_0 , mantendo todos os requisitos operacionais do sistema satisfeitos até o valor de carregamento ($S = \lambda_{max}^p * S_0$).

PASSO 1.6 – Se ($S = \lambda_{max}^p * S_0 > S_{max}$), siga para o PASSO 1.8, senão siga para o PASSO 1.7.

PASSO 1.7 – Fazer $p = p + 1$ e $\lambda = \lambda_{max}^{p-1}$ e retornar ao PASSO 1.2, para continuar a análise e obter novas ações de controle.

PASSO 1.8 – O SEP pode operar de forma segura durante todo intervalo de tempo considerado com as ações de controle previamente determinadas, isto é, foi possível determinar ações de controle de modo a não ocorrer violações das restrições operacionais, de demanda e de segurança, considerando-se o caso base e a lista inicial de contingências.

PASSO 1.10 – Não existem mais ações de controle que maximizem a margem de carregamento do SEP e mantenham as restrições operacionais, de demanda e de segurança satisfeitas, simultaneamente, para o caso base e a lista inicial de contingências. O SEP pode operar de forma segura até o valor de carregamento λ_{max}^{p-1} .

3.8. Considerações Finais

Neste capítulo, foram propostas duas formulações para o problema que determina as ações de controle do SEP.

O primeiro problema foi formulado utilizando a primeira estratégia, a qual consiste em dividir o período de análise em intervalos de tempo e de potência, e a segunda estratégia, a qual consiste em avaliar o SEP em três níveis de carregamento. Neste primeiro problema, determinam-se as ações de controle que minimizam as perdas nas linhas de transmissão e mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos, simultaneamente, para o caso base e para a lista de contingências, durante todo o intervalo de potência especificado.

O segundo problema foi formulado utilizando a segunda estratégia, a qual consiste em avaliar o SEP em três níveis de carregamento. Neste segundo problema, especifica-se o nível de carregamento atual (S_0) do SEP e determinam-se as ações de controle que maximizam a

margem de carregamento S_1 e mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos, simultaneamente, para o caso base e para a lista de contingências, durante todo o intervalo de potência de S_0 a S_1 .

As duas formulações propostas, para determinar as ações de controle do SEP, garantem que todos os requisitos operacionais do SEP são satisfeitos, principalmente o requisito relacionado à MET mínima de segurança, tanto para o caso base, quanto para as contingências.

Utilizando as duas formulações, foram propostos três planejamentos para a operação do SEP.

O primeiro planejamento determina a sequência de ações de controle, ao longo do dia, que minimizam as perdas nas linhas de transmissão e mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos, simultaneamente, para o caso e para todas as contingências da lista.

O segundo planejamento determina a sequência de ações de controle, ao longo do dia, que minimizam as perdas nas linhas de transmissão e mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos, simultaneamente, para o caso e para o maior número possível de contingências da lista.

O terceiro planejamento determina a sequência de ações de controle, ao longo do dia, que maximizam a margem de carregamento do sistema e mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos, simultaneamente, para o caso base e para todas as contingências da lista. Neste planejamento, o número de alterações nas ações de controle ao longo do dia é minimizado na medida em que se maximiza o valor da margem de carregamento.

Também foi proposta uma formulação e uma metodologia para identificar as contingências críticas do SEP e o valor de carregamento em que elas se tornam críticas. As contingências críticas do SEP devem ser identificadas para que o segundo planejamento da operação possa ser realizado.

O capítulo 4 apresenta os resultados para os planejamentos da operação, aplicados ao SEP de 14 Barras, utilizando as formulações, estratégias e metodologias aqui propostas.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos com a resolução das formulações e métodos propostos no capítulo 3. O sistema IEEE - 14 Barras modificado foi utilizado para validar os métodos, as estratégias e as formulações propostas (UNIVERSITY OF WASHINGTON ELECTRICAL ENGINEERING, 2009). No sistema original, a carga presente na barra 4 apresenta características do tipo capacitiva, seu valor foi mantido em magnitude, porém sua característica foi modificada para tipo indutiva. A tabela 4.1 mostra os valores iniciais das potências ativas e reativas nas barras de carga, potências ativas nas barras de geração e o intervalo de valores que as tensões nas barras podem assumir.

Tabela 4.1: Dados do SEP IEEE – 14 Barras modificado (UNIVERSITY OF WASHINGTON ELECTRICAL ENGINEERING, 2009).

Barra	Tipo	$P_g(pu)$	$P_L(pu)$	$Q_L(pu)$	$V_{max}(pu)$	$V_{min}(pu)$
1	θV	2,32	0	0	1,10	0,94
2	PV	0,4	0,217	0,127	1,10	0,94
3	PV	0	0,942	0,190	1,10	0,94
4	PQ	0	0,478	0,039	1,06	0,94
5	PQ	0	0,076	0,016	1,06	0,94
6	PV	0	0,112	0,075	1,10	0,94
7	PQ	0	0	0	1,06	0,94
8	PV	0	0	0	1,10	0,94
9	PQ	0	0,295	0,166	1,06	0,94
10	PQ	0	0,090	0,058	1,06	0,94
11	PQ	0	0,035	0,018	1,06	0,94
12	PQ	0	0,061	0,016	1,06	0,94
13	PQ	0	0,135	0,058	1,06	0,94
14	PQ	0	0,149	0,050	1,06	0,94

As tabelas 4.2-4.4 mostram os intervalos de valores que os *tap's* dos transformadores, as potências reativas geradas e a compensação de potência reativa dos dispositivos *shunt*, respectivamente, podem assumir.

Tabela: 4.2: Dados dos transformadores do SEP IEEE – 14 Barras

Transformador	Barra (k)	Barra (m)	tap_{km}^{min}	tap_{km}^{max}
1	4	7	0,909	1,11
2	4	9	0,909	1,11
3	5	6	0,909	1,11

Tabela: 4.3: Dados dos geradores do SEP IEEE – 14 Barras

Gerador (ID)	Barra	$Q_g^{min}(pu)$	$Q_g^{max}(pu)$
1	1	-1,00	1,00
2	2	-0,40	0,50
3	3	0,00	0,40
4	6	-0,06	0,24
5	8	-0,06	0,24

Tabela: 4.4: Dados dos dispositivos *shunt* do SEP IEEE – 14 Barras

Barra	$B_{SH}^{min}(pu)$	$B_{SH}^{max}(pu)$
9	-0,2	0,4

A tabela 4.5 mostra os parâmetros referentes às linhas de transmissão.

Tabela 4.5: Dados das linhas de transmissão do SEP IEEE – 14 Barras (UNIVERSITY OF WASHINGTON ELECTRICAL ENGINEERING, 2009).

Barra (k)	Barra (m)	$r_{km}(pu)$	$x_{km}(pu)$	$b_{km}^{sh}(pu)$	tap_{km}
1	2	0,0194	0,0592	0,0528	
1	5	0,054	0,223	0,0492	
2	3	0,047	0,198	0,0438	
2	4	0,0581	0,1763	0,034	
2	5	0,057	0,1739	0,0346	
3	4	0,067	0,171	0,0128	
4	5	0,0134	0,0421	0	
4	7	0	0,2091	0	0,978
4	9	0	0,5562	0	0,969
5	6	0	0,252	0	0,932
6	11	0,095	0,1989	0	
6	12	0,1229	0,2558	0	
6	13	0,0662	0,1303	0	
7	8	0	0,1762	0	

7	9	0	0,11	0	
9	10	0,0318	0,0845	0	
9	14	0,1271	0,2704	0	
10	11	0,082	0,1921	0	
12	13	0,2209	0,1999	0	
13	14	0,1709	0,348	0	

onde

- r_{km} e x_{km} são os valores da resistência e da reatância, respectivamente, da linha de transmissão que liga a barra k à barra m
- b_{km}^{sh} é o valor total da susceptância *shunt* da linha de transmissão que liga a barra k à barra m
- tap_{km} é a relação de transformação do transformador que conecta a barra k à barra m

O sistema de 14 barras analisado possui 9 barras de carga (n_{PQ}), 4 barras de geração (n_{PV}) e uma barra de referência (θV). A lista inicial de contingências (tabela 4.6) analisadas contém um total de 11 contingências (n_{NC}). A primeira coluna (ID) da tabela 4.6 mostra o número dado para identificação da contingência.

Tabela 4.6: Identificação das contingências analisadas.

ID	De	Para
1	2	4
2	2	5
3	6	11
4	6	12
5	6	13
6	7	9
7	9	10
8	9	14
9	10	11
10	12	13
11	13	14

A figura 4.1 apresenta o diagrama unifilar do SEP de 14 Barras.

Figura 4.1: Diagrama unifilar do SEP de 14 Barras (UNIVERSITY OF WASHINGTON ELECTRICAL ENGINEERING, 2009).

Conforme mencionado no capítulo 3, considerou-se que as potências ativas e reativas apresentam crescimento linear e proporcional em relação aos seus valores iniciais, assim o fator de potência das cargas foi mantido constante. A potência ativa e reativa inicial total do sistema e o fator de potência são calculados por

$$P_T = \sum_{i=1}^{14} P_{Li}^0 = 2,590 \text{ pu}$$

$$Q_T = \sum_{i=1}^{14} Q_{Li}^0 = 0,813 \text{ pu}$$

$$\phi = \text{atan} \frac{Q_T}{P_T} = 17,427^\circ$$

Foi utilizada uma taxa de crescimento de carga de $0,09 \text{ pu/hora}$ para a potência ativa total do sistema e $0,0283 \text{ pu/hora}$ para a potência reativa total do sistema, a fim de manter o fator de potência nas barras de cargas constantes.

Sem perda de generalidade, foi definido um período de tempo de 15 horas, com base nas curvas de carga horária do SIN, a hora inicial utilizada corresponde ao instante de tempo de menor consumo (3h00) e o instante de tempo final corresponde ao horário de pico do SEP (18h00), conforme pôde ser observado nas curvas de carga horária apresentadas no capítulo 3. As figuras 4.2-4.3 mostram as curvas de carga horária de potência ativa e reativa total, respectivamente, utilizadas para analisar o SEP de 14 barras.

Figura 4.2: Curva de carga horária referente à potência ativa do SEP

Figura 4.3: Curva de carga horária referente à potência reativa do SEP

Considerando que o instante de tempo inicial (3h00) corresponde a $t_0 = 0$, o período de tempo considerado compreende o intervalo de tempo de t_0 a t_{15} . As potências ativas nas barras de carga e de geração e as potências reativas nas barras de carga do sistema em função do tempo foram calculadas por

$$P_k(t_n) = P_k(t_0) * (1 + \frac{1}{P_T(t_0)} 0,09 * t_n)$$

$$Q_k(t_n) = Q_k(t_0) * (1 + \frac{1}{Q_T(t_0)} 0,0283 * t_n)$$

Utilizando como referência as potências iniciais nas barras do sistema (S_k^0) e o valor de 5% para o valor de segurança da MET mínima ($MET_{especificada}^{minima}$), a tabela 4.7 apresenta o fator de multiplicação λ que especifica os valores das potências, ao longo do dia, em relação às potências iniciais, nos três níveis de carregamento em que o SEP será avaliado para cada intervalo de tempo.

onde,

$$S_k^0 = P_k^0 + jQ_k^0 \quad \forall k \in \Omega_{PQ} \quad (4.1)$$

$$S_k^0 = P_k^0 \quad \forall k \in \Omega_{PV} \quad (4.2)$$

Tabela 4.7: Potências especificadas, em relação às potências iniciais, para os três níveis de carregamento em que o SEP é avaliado.

n	$S_k(t_n)$		$S_k(t_{n+1})$		$S_k = S_k(t_{n+1}) * 1,05$	
0	1	$* S_k^0$	1,035	$* S_k^0$	1,086	$* S_k^0$
1	1,035		1,069		1,123	
2	1,069		1,104		1,159	
3	1,104		1,139		1,196	
4	1,139		1,174		1,232	
5	1,174		1,208		1,269	
6	1,208		1,243		1,305	
7	1,243		1,278		1,342	
8	1,278		1,313		1,378	
9	1,313		1,347		1,415	
10	1,347		1,382		1,451	
11	1,382		1,417		1,488	
12	1,417		1,452		1,524	
13	1,452		1,486		1,561	
14	1,486		1,521		1,597	

Como exemplo, considere as potências da barra de carga número 4. A tabela 4.8 mostra os valores das potências ativa e reativa, em cada intervalo de tempo, nos três níveis de carregamento em que o SEP foi avaliado.

Tabela 4.8: Potências especificadas, barra de carga 4, nos pontos de avaliação do SEP

n	$S_0^4(pu)$		$S_1^4(pu)$		$S_2^4(pu)$	
	$P_4(t_n)$	$Q_4(t_n)$	$P_4(t_{n+1})$	$Q_4(t_{n+1})$	$P_4(t_{n+1}) * 1.05$	$Q_4(t_{n+1}) * 1.05$
0	0,478	0,039	0,495	0,040	0,519	0,042
1	0,495	0,040	0,511	0,042	0,537	0,044
2	0,511	0,042	0,528	0,043	0,554	0,045
3	0,528	0,043	0,544	0,044	0,572	0,047
4	0,544	0,044	0,561	0,046	0,589	0,048
5	0,561	0,046	0,578	0,047	0,607	0,049
6	0,578	0,047	0,594	0,048	0,624	0,051
7	0,594	0,048	0,611	0,050	0,641	0,052
8	0,611	0,050	0,627	0,051	0,659	0,054
9	0,627	0,051	0,644	0,053	0,676	0,055
10	0,644	0,053	0,661	0,054	0,694	0,057
11	0,661	0,054	0,677	0,055	0,711	0,058
12	0,677	0,055	0,694	0,057	0,729	0,059
13	0,694	0,057	0,711	0,058	0,746	0,061
14	0,711	0,058	0,727	0,059	0,764	0,062
15	0,727	0,059	0,744	0,061	0,781	0,064

Os números de variáveis, restrições de desigualdade e restrições de igualdade que foram utilizadas na formulação do problema de otimização PO_1 , considerando-se a análise do caso base e da lista de contingências inicial, são

$$n_{\theta} = n_{op} * n_C (n_{PQ} + n_{PV}) = 3 * 12 * (9 + 4) = 468 \quad (4.3)$$

$$n_V = n_{op} * n_C * n_{PQ} = 3 * 12 * 9 = 324 \quad (4.4)$$

$$n_G = (n_{PV} + 1) = 5 \quad (4.5)$$

$$n_{\mu} = (n_{TR} + n_{SH} + n_G) = 3 + 1 + 5 = 9 \quad (4.6)$$

$$n_P = n_{op} * n_C (n_{PQ} + n_{PV}) = 3 * 12 * 13 = 468 \quad (4.7)$$

$$n_Q = n_{op} * n_C * n_{PQ} = 3 * 12 * 9 = 324 \quad (4.8)$$

$$n_{RI} = n_{op} * n_C * (2 * n_{PQ} + n_{PV}) = 792 \quad (4.9)$$

$$n_{RD} = n_{EC} + n_{ENC} + n_{Qg} \quad (4.10)$$

$$n_{EC} = 2 * (n_{TR} + n_{SH} + n_G) = 18 \quad (4.11)$$

$$n_{ENC} = (n_{op} - 1) * n_c * 2 * n_{PQ} = 432 \quad (4.12)$$

$$n_{Qg} = n_{op} * n_c * 2 * n_G = 360 \quad (4.13)$$

No terceiro nível de carregamento S_2 , as tensões das barras de carga podem estar fora dos limites de operação e por isso o termo $(n_{op} - 1)$ em n_{ENC} .

Para resolver os problemas de otimização foi utilizada a função *fmincon* do software MATLAB, onde devem ser especificados o método e os valores das tolerâncias para a convergência do processo. O método dos pontos interiores foi utilizado para obter os resultados dos problemas de otimização e como critérios de convergência foram utilizados os seguintes valores para as tolerâncias

$$TolFun = 1 * 10^{-3} \leq |f(X_i) - f(X_{i+1})|$$

$$TolX = 1 * 10^{-6} \leq |X_i - X_{i+1}|$$

$$TolCon = 1 * 10^{-6} < R_D$$

$$TolCon = 1 * 10^{-6} < |R_I|$$

onde,

- *TolFun* é o limite mínimo especificado para a variação do valor da função objetivo, onde a variação do valor da função objetivo é calculada pela norma da diferença entre os valores da função objetivo calculadas com os estados X em duas iterações consecutivas i e $i + 1$
- *TolX* é o limite mínimo especificado para o tamanho do passo, se na solução o passo utilizado for menor que a tolerância definida as iterações terminam, sendo calculadas pela diferença entre os valores dos estados X em duas iterações consecutivas i e $i + 1$
- *TolCon* é o limite superior para a magnitude de qualquer restrição, ou seja, após a convergência do método se a solução retornar um ponto em que o módulo das restrições de igualdade ($|R_I|$) são maiores que a tolerância, ou as restrições de desigualdade (R_D) são maiores que a tolerância, o solver informa que existem restrições violadas.

No método de otimização é necessário definir valores iniciais para os estados do problema, foram utilizados os valores de $1\ pu$ e $0\ rad$ para as tensões e ângulos, respectivamente, em todas as barras, $tap_{km} = 1$ para todos os transformadores e $b_k^{SH} = 0$ para o banco de capacitores.

Uma vez, definidos os intervalos de tempo, as potências especificadas nas barras para cada instante de tempo, a lista inicial de contingências e os limites de valores que as variáveis e as grandezas do SEP podem assumir, a seção 4.1 apresenta os resultados para o planejamento da operação do SEP, determinando a sequência de ações de controle que mantém todos os requisitos operacionais do SEP satisfeitos enquanto não existirem contingências críticas.

4.1. Resultados do planejamento da operação do SEP

Inicialmente, serão mostrados os resultados para o planejamento da operação do SEP enquanto não existirem contingências críticas, isto é, serão determinadas as ações de controle, através da resolução do problema PO_1 , para cada intervalo de tempo até o intervalo de tempo em que o problema PO_1 não apresentar solução, conforme os passos descritos no fluxograma da figura 3.12.

O problema de otimização PO_1 pôde ser aplicado até o intervalo de tempo $t_{10} - t_{11}$ satisfazendo todos os requisitos operacionais do SEP. A média do tempo e do número de iterações da simulação para resolução do problema de otimização PO_1 com a lista de contingências inicial foi de 890 segundos ($\approx 15\ minutos$) e 16 iterações, respectivamente.

A fim de validar a eficácia da formulação do problema PO_1 , foram mostrados os resultados obtidos através da resolução de PO_1 . As figuras 4.4-4.6 mostram as ações de controle, as tensões nas barras de geração, os valores dos *Tap's* dos transformadores e a compensação reativa do dispositivo *shunt*, respectivamente, determinadas na resolução do problema de otimização em cada intervalo de tempo dentro do período $(t_0 - t_{11})$.

Figura 4.4: Valores das tensões dos geradores determinados por PO_1 no período $(t_0 - t_{11})$

Figura 4.5: Valores dos Tap's dos transformadores determinados por PO_1 no período $(t_0 - t_{11})$

Figura 4.6: Valores das compensações de potência reativa determinados por PO_1 no período $(t_0 - t_{11})$

A figura 4.7 mostra os valores das perdas nas linhas de transmissão durante o período $(t_0$ a $t_{11})$ para o caso base.

Figura 4.7: Valores calculados das perdas nas linhas de transmissão durante o período $(t_0 - t_{11})$

As figuras 4.8-4.11 mostram as tensões das barras de carga do SEP, para o caso base e a lista de contingências, no período de t_0 a t_{11} .

Figura 4.8: Valores das tensões, do caso base, nas barras de carga do SEP durante o período t_0 a t_{11}

Figura 4.9: Valores das tensões, das contingências de 1 a 4, nas barras de carga do SEP durante o período t_0 a t_{11}

Figura 4.10: Valores das tensões, das contingências de 5 a 8, nas barras de carga do SEP durante o período t_0 a t_{11}

Figura 4.11: Valores das tensões, das contingências de 9 a 11, nas barras de carga do SEP durante o período t_0 a t_{11}

Podemos observar nos gráficos apresentados nas figuras 4.8-4.11 que não ocorreram violações nas restrições de tensão das barras do SEP em todas as contingências e no caso base, isto é, as tensões permaneceram dentro dos limites máximos e mínimos durante todos os

intervalos de tempo. Os gráficos das figuras 4.12-4.16 mostram as potências reativas geradas de cada gerador para todos os casos analisados (caso base e contingências).

Figura 4.12: Potência reativa gerada pelo gerador 1, para todos os casos, no período de t_0 a t_{11}

Figura 4.13: Potência reativa gerada pelo gerador 2, para todos os casos, no período de t_0 a t_{11}

Figura 4.14: Potência reativa gerada pelo gerador 3, para todos os casos, no período de t_0 a t_{11}

Figura 4.15: Potência reativa gerada pelo gerador 4, para todos os casos, no período de t_0 a t_{11}

Figura 4.16: Potência reativa gerada pelo gerador 5, para todos os casos, no período de t_0 a t_{11}

Podemos observar que os geradores também permaneceram dentro dos limites inferiores e superiores de geração de potência reativa para todas as contingências e para o caso base em todos os intervalos de tempo.

Para verificar a restrição de segurança de MET mínima, as figuras 4.18 - 4.24 mostram as curvas PV, da barra de carga 11, do caso base e das contingências, durante o período t_0 a t_{11} . As curvas PV foram construídas com os controles definidos na resolução do problema de otimização PO_1 , em cada intervalo de tempo, e com os pontos de operação obtidos através da resolução do fluxo de carga, seguindo o crescimento de carga especificado.

A curva PV foi construída até o momento em que o crescimento de carga fizesse com que algum dos geradores atingisse o seu limite de geração de reativos ou até o ponto de máximo carregamento do sistema. Nestas figuras, a curva na cor preta representa a operação do SEP, a curva na cor azul é a continuação da curva PV referente àquele intervalo de tempo, onde o final da curva azul representa o nível de carregamento referente ao valor da MET mínima de segurança especificada (5%) e a curva em vermelho é a continuação da curva PV em azul, a qual é ilustrada para mostrar o quanto as cargas do SEP podem ainda ser aumentadas além do valor da MET mínima de segurança especificada.

Considere, como exemplo, as ações de controle definidas para o intervalo de tempo t_0 a t_1 . A figura 4.17 mostra a curva PV da barra de carga 4, no caso base e, conforme

mencionado, a curva na cor preta representa os pontos de operação do SEP, cujos níveis de carregamentos vão de $\lambda_0 = S_0(t_0)$ a $\lambda_1 = S_1(t_1)$. A curva na cor azul representa os pontos de operação do SEP, cujo intervalo de potências especificadas vão de $\lambda_1 = S_1(t_1)$ a $\lambda_2 = S_2(S_1)$, a existência desses pontos de operação garante que a MET seja, no mínimo, igual ao valor mínimo de segurança especificado e, é no intervalo de S_0 a S_2 , que o problema de otimização PO_1 é resolvido.

Continuando o traçado da curva PV , a curva na cor vermelha representa os pontos de operação do SEP, cujo intervalo de potências especificadas vão de $\lambda_2 = S_2(S_1)$ a λ_3 , onde, em λ_3 , o primeiro gerador atinge o seu limite de geração de reativos.

A fim de diferenciar o valor das potências que correspondem a MET mínima de segurança especificada ($\lambda_2 = S_2(S_1)$) e a MET do SEP, continuou-se o traçado desta curva PV (curva na cor verde). Nesta figura, $\lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$ e λ_7 são os níveis de carregamento em que os geradores G_3, G_4, G_2, G_5 e G_1 , respectivamente, atingiram seus limites de geração de potência reativa. Como todos os geradores atingiram seus limites de geração de potência reativa, o valor da MET do SEP corresponde ao valor das potências em $\lambda_7 = 1,585$, este valor corresponde ao PMC do SEP para este caso, pois os geradores do SEP não são mais capazes de fornecer potência reativa para as cargas do sistema e fechar o balanço de potência do sistema.

Figura 4.17: Curva PV da barra de carga 4

Figura 4.18: Verificação da existência da MET igual ou superior ao valor especificado (caso base)

Figura 4.19: Verificação da existência da MET igual ou superior ao valor especificado (contingências 1 e 2)

Figura 4.20: Verificação da existência da MET igual ou superior ao valor especificado (contingências 3 e 4)

Figura 4.21: Verificação da existência da MET igual ou superior ao valor especificado (contingências 5 e 6)

Figura 4.22: Verificação da existência da MET igual ou superior ao valor especificado (contingências 7 e 8)

Figura 4.23: Verificação da existência da MET igual ou superior ao valor especificado (contingências 9 e 10)

Figura 4.24: Verificação da existência da MET igual ou superior ao valor especificado (contingência 11)

Podemos observar que as soluções obtidas para as ações de controle, determinadas na resolução do problema de otimização PO_1 , garantem que o valor da MET seja, no mínimo, igual ao valor mínimo de segurança especificado para todas as contingências e para o caso base, pois, se não existisse MET, não seria possível realizar o traçado das curvas PV até os valores das potências especificadas correspondentes ao valor da MET mínima especificada.

Analisando as figuras 4.8 a 4.24, podemos verificar que os requisitos operacionais do SEP foram satisfeitos, através das ações de controle determinadas pelo problema PO_1 para cada intervalo de tempo, no período de t_0 a t_{11} . No intervalo de tempo t_{11} a t_{12} o problema de otimização PO_1 não apresentou solução e, portanto, existe alguma contingência que está impedindo a convergência do problema. Sendo assim, a metodologia para identificação das contingências críticas deve ser realizada. A continuação do planejamento da operação do SEP, com identificação das contingências críticas, será mostrada na seção 4.3. Contudo, antes de continuar o planejamento, na seção 4.2, foi analisado o custo em se manter os requisitos operacionais do SEP satisfeitos, simultaneamente, para o caso base e a lista de contingências.

4.2. Comparação entre as perdas nas linhas de transmissão analisando somente o caso base e o caso base mais a lista de contingências

Foi verificado que até o instante de tempo t_{11} o SEP foi mantido no estado normal seguro. Para mostrar o custo da manutenção da segurança do sistema, considere que o problema PO_1 seja resolvido durante o mesmo período de tempo (t_0 a t_{11}) para dois cenários distintos. O primeiro cenário resolve o problema PO_1 analisando o caso base e a lista de

contingências, o segundo cenário resolve PO_1 sem considerar a lista de contingências. O gráfico da figura 4.25 mostra as perdas nas linhas de transmissão para ambos os cenários.

Figura 4.25: Valores das perdas nas linhas de transmissão durante o período t_0 a t_{11} para os dois cenários considerados

Podemos observar através da figura 4.25, os valores das perdas nos dois cenários analisados, podemos verificar a diferença entre os valores das perdas nas linhas de transmissão e o custo em se manter o SEP seguro, isto é, satisfazendo todos os requisitos operacionais, simultaneamente, para o caso base e a lista de contingências. Podemos observar também que, no intervalo de t_2 a t_3 , os dois cenários apresentaram as mesmas perdas. As figuras 4.26-4.28 mostram os controles definidos para os dois cenários, onde as linhas contínuas e tracejadas representam o cenário 1 e 2, respectivamente.

Figura 4.26: Valores das tensões dos geradores durante o período t_0 a t_{11} para os dois cenários considerados

Figura 4.27: Valores dos $Tap's$ dos transformadores durante o período t_0 a t_{11} para os dois cenários considerados

Figura 4.28: Valores das compensações de potência reativa durante o período t_0 a t_{11} para os dois cenários considerados

Podemos observar através das figuras 4.26-4.28 que os controles definidos nos dois cenários, para o intervalo de tempo t_2 a t_3 , são diferentes, sendo assim possível verificar a existência de mais de um mínimo na resolução do problema PO_1 , pois os controles que foram definidos no cenário 1 podem também ser aplicados no cenário 2, onde somente é analisado o caso base. Pode se dizer que ao inserir as contingências no problema PO_1 as direções de busca que minimizam a função objetivo no método de otimização são diferentes resultando em diferentes resultados. Na seção seguinte, continuou-se o planejamento da operação do SEP, identificando as contingências críticas e determinando as ações de controle que mantém o SEP com o menor risco operacional.

4.3. Resultados do planejamento da operação do SEP minimizando as perdas nas linhas de transmissão e o risco operacional do sistema

Vimos na seção 4.1 que o problema de otimização PO_1 pôde ser resolvido até o intervalo de tempo t_{10} a t_{11} , sem que existissem contingências críticas.

Seguindo com os passos descritos no fluxograma 3.15, como não foi possível obter solução para o problema PO_1 a partir do instante de tempo t_{11} , para continuar o planejamento da operação do SEP, a metodologia para identificação das contingências críticas deve ser

realizada. Sendo assim, inicialmente, o problema PO_2 deve ser resolvido e, a seguir, a análise das variáveis de folga ou do fluxo de carga continuado realizada para determinar a contingência que impede a convergência do problema PO_1 no intervalo de tempo t_{11} a t_{12} .

O resultado do problema PO_2 determina as ações de controle que maximizam a margem de carregamento do SEP, cujo objetivo é determinar o valor máximo de demanda do SEP em que é possível manter as restrições operacionais, de demanda e de segurança satisfeitas, simultaneamente, para o caso base e a lista de contingências.

Conforme exposto no capítulo 3, a formulação do problema PO_2 parametriza o crescimento de carga do SEP em função das potências iniciais nas barras através da variável λ , de forma que, a resolução do problema PO_2 , determina as ações de controle e a o valor máximo de carregamento (λ_{max}) em que é possível satisfazer os requisitos operacionais do SEP, simultaneamente, para o caso base e a lista de contingências.

Resolvendo o problema PO_2 com a lista inicial de contingências, foi obtido o valor de $\lambda_{max} = 1,4118$. Este nível de carregamento é o maior valor de carregamento em que é possível satisfazer todas as restrições do SEP, simultaneamente, para o caso base e a lista de contingências. Isto é, em $\lambda_{max} = 1,4118$, todas as tensões encontram-se dentro dos limites máximos e mínimos permitidos e em $\lambda_{MET}^{especificada} = 1,05 * 1,4118 = 1,4823$ é assegurado que todas as contingências e o caso base possuem MET, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado.

A tabela 4.9 compara o valor de carregamento λ_{max} , obtido em PO_2 , com o valor de carregamento do intervalo t_{11} a t_{12} .

Tabela 4.9: Valores dos carregamentos no intervalo t_{11} a t_{12} e do problema de otimização PO_2

	λ_0	λ_1	λ_2
$t_{11} - t_{12}$	1,382	1,4170	1,4880
PO_2	-----	1,4118	1,4823

Podemos notar que realmente não é possível obter solução para o problema de otimização PO_1 no intervalo de tempo t_{11} a t_{12} , pois o valor de máximo carregamento em que é possível manter todas as restrições operacionais do SEP satisfeitas, obtido por PO_2 , foi de $\lambda_1 = 1,4118$, cujo valor é menor que o valor de carregamento $\lambda_1 = 1,4170$ do intervalo $t_{11} - t_{12}$.

Portanto, não existe solução para os dispositivos de controle do SEP que mantenham o sistema dentro da região factível de operação no intervalo de tempo t_{11} a t_{12} . Podemos notar que existe uma relação entre o valor de carregamento λ_{max} , obtido através da resolução do problema PO_2 , e o valor de carregamento λ_1 do intervalo de tempo que está sendo analisado para que o problema PO_1 apresente solução. Para que não exista contingência crítica no intervalo de tempo analisado, a condição $\lambda_1^{intervalo} \leq \lambda_1^{PO_2}$ deve ser satisfeita.

Como a condição não é satisfeita, existe alguma contingência que está impedindo a convergência do problema PO_1 no intervalo de tempo t_{11} a t_{12} e, sendo assim, a contingência crítica deve ser identificada e excluída da lista de contingências que estão sendo analisadas.

Com o resultado do problema PO_2 , para determinar a contingência crítica, as variáveis de folga devem ser analisadas ou o fluxo de carga continuado deve ser utilizado para verificar quais as restrições do SEP estão no limite de serem violadas, conforme a metodologia proposta no capítulo 3. A fim de comparar os resultados, a contingência crítica foi determinada utilizando as variáveis de folga e o FCC.

Com o resultado das ações de controle obtidas no problema PO_2 , foi realizado um fluxo de carga continuado para cada contingência da lista. Para cada contingência foi observado se em $\lambda_{PO_2}^1$ alguma restrição de tensão estaria no limiar de ser violada, ou em $\lambda_{PO_2}^2$ alguma restrição de limite de potência reativa gerada estaria no limiar de ser violada, ou se o valor de $\lambda_{PO_2}^2$ coincide com o PMC.

Para determinar a contingência crítica utilizando as variáveis de folga, após a convergência do problema de otimização PO_2 , as variáveis de folga foram analisadas, sendo que, quanto mais próximo o valor da variável de folga está de zero, mais próxima a restrição está de ser violada.

Conforme exposto no capítulo 3, os valores que devem ser analisados são os valores associadas aos estados e as grandezas que impedem o aumento na demanda do sistema, estes valores estão associados aos limites inferiores de tensão no valor de carregamento $\lambda_{PO_2}^1$ e os limites superiores de potência reativa gerada no valor de carregamento $\lambda_{PO_2}^2$ determinados na resolução do problema PO_2 .

Resolvendo o problema PO_2 , considerando-se o caso base e a lista de contingências inicial (L_{cont}^0), foi obtido o valor de máximo carregamento do SEP (tabela 4.10).

$$L_{cont}^0 = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11]$$

Tabela 4.10: Valores de λ_1 e λ_2 determinados por $PO_2(L_{cont}^0)$

PO_2	$\lambda_1^{PO_2}$	$\lambda_2^{PO_2}$
1°	1,4118	1,4823

O número de variáveis de folga que devem ser analisadas, considerando a lista de contingências inicial (n_{NC}), relacionadas aos limites inferiores de tensão é $n_{VF}^{tensão} = n_{NC} * n_{PQ} = 11 * 9 = 99$ e o número de variáveis de folga que devem ser analisadas relacionadas aos limites superiores de potência reativa gerada é $n_{VF}^G = n_{NC} * (n_{PV} + 1) = 11 * 5 = 55$.

Devido ao grande número de variáveis de folga a serem analisadas, as variáveis de folga com valor inferior a 0,01 foram selecionadas para determinar a contingência crítica. A tabela 4.11 mostra, em ordem crescente dos valores das variáveis de folga, os resultados obtidos, utilizando essa seleção. A primeira coluna da tabela indica o tipo da restrição, limite inferior de tensão ou limite superior de geração de potência reativa, e as colunas seguintes indicam a contingência, a barra e o valor da variável de folga (d), respectivamente.

Tabela 4.11: Valores das variáveis de folga para identificação da 1° contingência crítica

Restrição	Caso (ID)	Barra	d
V_{inf}	8	14	1,40E-07
Q_g^{sup}	1	6	6,79E-07
Q_g^{sup}	1	8	1,29E-06
Q_g^{sup}	1	3	1,88E-06
Q_g^{sup}	6	2	3,22E-06
Q_g^{sup}	5	2	7,38E-04
Q_g^{sup}	6	6	1,62E-03
V_{inf}	5	13	9,22E-03

A tabela 4.12 mostra os resultados obtidos através do fluxo de carga continuado. A primeira coluna da tabela indica o tipo da restrição, limite inferior de tensão ou limite superior de geração de potência reativa, e as colunas seguintes indicam a contingência, a barra e o valor do carregamento em que a restrição foi violada, respectivamente.

Tabela 4.12: Valores de carregamento para identificação da 1ª contingência crítica

Restrição	Caso (ID)	Barra	λ_{FCC}
V_{inf}	8	14	1,4118
Q_g^{sup}	1	6	1,48234882
Q_g^{sup}	6	2	1,48235182
Q_g^{sup}	5	2	1,48298182

Analisando os valores de carregamento obtidos no FCC, podemos verificar que a tensão da barra 14 no caso 8 tem seu limite violado em $\lambda_{FCC} = 1,4118$. Comparando este valor ao valor do carregamento do instante de tempo t_{12} ($\lambda_1 = 1,4170$), onde, neste ponto, todas as tensões devem situar-se dentro dos limites permitidos, podemos inferir que a tensão da barra 14 no caso 8 pode ser um dos fatores que estejam impedindo a resolução do problema PO_1 , pois $\lambda_{FCC} < \lambda_1$.

Podemos verificar também, através do FCC, que a geração de potência reativa na barra 6 no caso 1 tem seu limite violado em $\lambda_{FCC} = 1,48234882$. Comparando este valor ao valor do carregamento que garante MET igual ao valor mínimo especificado do intervalo de tempo t_{11} a t_{12} ($\lambda_2 = 1,488$), podemos inferir que a geração de potência reativa do gerador conectado à barra 6 no caso 1 pode ser um dos fatores que estejam impedindo a resolução do PO_1 , pois $\lambda_{FCC} < \lambda_2$.

A análise das variáveis de folga é realizada de forma direta, isto é, a contingência cujo valor da variável de folga está mais próximo de zero é candidata à contingência crítica. Analisando os valores das variáveis de folga apresentados na tabela 4.11, podemos verificar que as variáveis relacionadas à tensão da barra 14 no caso 8 e geração de potência reativa na barra 6 no caso 1 são as variáveis de folga mais próximas de zero.

Como os dois valores de carregamento obtidos pelo FCC são muito próximos dos valores dos carregamentos obtidos em PO_2 e as variáveis de folga também apresentam valores muito próximos uns dos outros, devemos considerar uma nova estratégia para identificação da contingência crítica, a qual consiste em resolver novamente o problema PO_2 excluindo os casos mais prováveis, os casos 1 e 8, um por vez da lista de contingências, e verificar em qual resolução obtêm-se maiores valores para $\lambda_1^{PO_2}$. A tabela 4.13 mostra os

valores de $\lambda_1^{PO_2}$ e $\lambda_2^{PO_2}$, obtidos resolvendo o problema de otimização PO_2 , com a exclusão do caso 1 e do caso 8.

Tabela 4.13: Valores máximos de carregamento, obtidos por PO_2 , com a exclusão do caso 1 ou 8 da lista de contingências

Caso Excluído	$\lambda_1^{PO_2}$	$\lambda_2^{PO_2}$
1	1,4351	1,5069
8	1,4267	1,4980

Podemos notar que a exclusão do caso 1 possibilita um maior aumento na carga do sistema sem que haja violação das restrições para o restante das contingências. Portanto, o caso 1 deve ser excluído da lista de contingências e adicionado à lista de contingências críticas (L_{CC}).

$$L_{cont}^1 = [2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11]$$

$$L_{CC} = [1]$$

A tabela 4.14 compara o valor de carregamento obtido em PO_2 , considerando a lista de contingências L_{cont}^1 , com o valor de carregamento do intervalo t_{11} a t_{12} .

Tabela 4.14: Valores de carregamento do intervalo t_{11} a t_{12} e obtidos por $PO_2(L_{cont}^1)$

	λ_0	λ_1	λ_2
$t_{11} - t_{12}$	1,382	1,4170	1,4880
$PO_2(L_{cont}^1)$	-----	1,4351	1,5069

Podemos notar que agora é possível obter solução para o problema de otimização PO_1 , pois a condição $\lambda_1^{t_{11}-t_{12}} \leq \lambda_1^{PO_2}$ é satisfeita.

O procedimento para obter a solução de PO_1 e determinar a contingência crítica deve ser aplicado repetidas vezes até o intervalo final do período considerado, conforme o fluxograma, figura 3.15, apresentado no capítulo 3.

Na tabela 4.15, a primeira coluna mostra o intervalo de tempo que está sendo analisado. A segunda, terceira e a quarta coluna mostram os valores de λ_0, λ_1 e λ_2

correspondentes aos níveis de carregamento do intervalo de tempo, a quinta coluna mostra o resultado de $\lambda_1^{PO_2}$ obtido na resolução do problema de otimização PO_2 , com a lista de contingências considerada naquele intervalo de tempo, e a sexta coluna, quando existir solução para o problema de otimização PO_1 , mostra o valor das perdas nas linhas de transmissão, obtido através da resolução de PO_1 , com a lista de contingências considerada naquele intervalo de tempo.

Tabela 4.15: Valores de carregamento do intervalo t_{11} a t_{12} e obtidos por $PO_2(L_{cont}^1)$ e das perdas nas linhas de transmissão

	λ_0	λ_1	λ_2	$PO_2(L_{cont}^1)$	$PO_1(L_{cont}^1)$
				λ_1	Perdas(pu)
$t_{11} - t_{12}$	1,382	1,417	1,488	1,4351	0,2682

As tabelas 4.16–4.32 mostram a sequência dos resultados para os próximos intervalos de tempo, onde, nestas tabelas, o valor das perdas não será apresentado na tabela quando o problema PO_1 não convergir e novas contingências críticas devem ser identificadas aplicando o problema PO_2 e analisando as variáveis de folga e/ou o fluxo de carga continuado, ou resolvendo novamente o problema PO_2 excluindo as contingências críticas mais prováveis.

Tabela 4.16: Valores dos carregamentos no intervalo t_{12} a t_{13} e do problema de otimização $PO_2(L_{cont}^1)$

	λ_0	λ_1	λ_2	$PO_2(L_{cont}^1)$	$PO_1(L_{cont}^1)$
				λ_1	Perdas(pu)
$t_{12} - t_{13}$	1,417	1,4520	1,5240	1,4351	-----

Tabela 4.17: Valores das variáveis de folga para identificação da 2ª contingência crítica

Restrição	Caso	Barra	d
Q_g^{sup}	8	6	6,65E-07
V_{inf}	8	14	1,40E-07
Q_g^{sup}	6	2	2,13E-06
Q_g^{sup}	2	3	2,18E-06
Q_g^{sup}	5	8	2,19E-06

Q_g^{sup}	6	6	6,94E-05
Q_g^{sup}	5	2	6,24E-04
Q_g^{sup}	2	6	1,26E-03
V_{inf}	5	13	8,54E-03

Tabela 4.18: Valores de carregamento para identificação da 2° contingência crítica

Restrição	Caso	Barra	λ_{FCC}
V_{inf}	8	14	1,43511190
Q_g^{sup}	8	6	1,50686649
Q_g^{sup}	6	2	1,50686749
Q_g^{sup}	2	3	1,50686849
Q_g^{sup}	5	8	1,50687249

$$L_{cont}^2 = [2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 9 \ 10 \ 11]$$

$$L_{CC} = [1 \ 8]$$

Tabela 4.19: Valores de carregamento do intervalo t_{12} a t_{13} e obtidos por $PO_2(L_{cont}^2)$ e das perdas nas linhas de transmissão

	λ_0	λ_1	λ_2	$PO_2(L_{cont}^2)$	$PO_1(L_{cont}^2)$
				λ_1	Perdas(pu)
$t_{12} - t_{13}$	1,417	1,4520	1,5240	1,4636	0,2875

Tabela 4.20: Valores de carregamento do intervalo t_{13} a t_{14} e obtidos por $PO_2(L_{cont}^2)$

	λ_0	λ_1	λ_2	$PO_2(L_{cont}^2)$	$PO_1(L_{cont}^2)$
				λ_1	Perdas(pu)
$t_{13} - t_{14}$	1,452	1,486	1,561	1,4636	-----

Tabela 4.21: Valores das variáveis de folga para identificação da 3° contingência crítica

Restrição	Caso	Barra	d
Q_g^{sup}	2	3	9,45E-07
Q_g^{sup}	2	1	9,58E-07
Q_g^{sup}	2	6	1,05E-06
Q_g^{sup}	5	8	1,17E-06
Q_g^{sup}	6	2	1,57E-06
Q_g^{sup}	6	6	1,43E-05
V_{inf}	5	13	8,62E-04
Q_g^{sup}	5	2	1,20E-03
Q_g^{sup}	2	1	4,94E-03

Tabela 4.22: Valores de carregamento para identificação da 3° contingência crítica

Restrição	Caso	Barra	λ_{FCC}
Q_g^{sup}	2	3	1,53683164
Q_g^{sup}	6	2	1,53683264
Q_g^{sup}	5	8	1,53683564

$$L_{cont}^3 = [3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 9 \ 10 \ 11]$$

$$L_{CC} = [1 \ 8 \ 2]$$

Tabela 4.23: Valores de carregamento do intervalo t_{13} a t_{14} e obtidos por $PO_2(L_{cont}^3)$

	λ_0	λ_1	λ_2	$PO_2(L_{cont}^3)$	$PO_1(L_{cont}^3)$
				λ_1	Perdas(pu)
$t_{13} - t_{14}$	1,452	1,486	1,561	1,4840	-----

Tabela 4.24: Valores das variáveis de folga para identificação da 4° contingência crítica

Restrição	Caso	Barra	d
V_{inf}	5	13	3,00E-08
Q_g^{sup}	6	2	3,94E-07

Q_g^{sup}	5	3	5,84E-07
Q_g^{sup}	5	8	6,27E-07
Q_g^{sup}	7	6	8,76E-07
Q_g^{sup}	6	6	5,19E-06
Q_g^{sup}	5	2	9,73E-04
Q_g^{sup}	6	3	4,31E-03
Q_g^{sup}	3	3	6,55E-03

Tabela 4.25: Valores de carregamento para identificação da 4ª contingência crítica

Restrição	Caso	Barra	λ_{FCC}
V_{inf}	5	13	1,4839980
Q_g^{sup}	5	3	1,5581986
Q_g^{sup}	6	2	1,5581986
Q_g^{sup}	7	6	1,5581986

Analisando os valores das variáveis de folga e dos λ obtidos no FCC, notamos, para este resultado, a dificuldade em determinar a contingência crítica. Portanto, o problema PO_2 deve ser resolvido excluindo as contingências 5, 6 e 7, uma por vez, e seus resultados comparados. O restante das contingências da lista L_{cont}^3 também foi analisado, a fim de mostrar que, quando a análise das variáveis de folga e o resultado do fluxo de carga continuado não são capazes de identificar a contingência crítica, eles fornecem uma boa indicação da contingência crítica. A tabela 4.26 mostra os resultados de λ_1 , obtidos através da resolução de PO_2 , com a exclusão de cada contingência da lista (L_{cont}^3).

Tabela 4.26: Valores de carregamento obtidos por PO_2 excluindo cada contingência da lista L_{cont}^3

Contingência Excluída	PO_2 λ_1
5	1,5209
7	1,5110
6	1,4845
3	1,4840
4	1,4840
9	1,4840
10	1,4840
11	1,4840

Analisando a tabela 4.26, verificamos que, entre as contingências 5, 6 e 7, a exclusão da contingência 5 da lista garante melhor solução para λ_1 , analisando os valores de λ_1 das demais contingências, verificamos também que a tensão da barra 13 no caso 5 impede o aumento na demanda do SEP nos casos 3, 4, 9, 10 e 11, pois os valores de λ_1 são exatamente iguais ao carregamento onde ocorre a violação de tensão na barra 13 da contingência 5. Portanto, a contingência 5 deve ser excluída e adicionada à lista de contingências críticas.

$$L_{cont}^4 = [3 \ 4 \ 6 \ 7 \ 9 \ 10 \ 11]$$

$$L_{CC} = [1 \ 8 \ 2 \ 5]$$

Tabela 4.27: Valores de carregamento do intervalo t_{13} a t_{14} e obtidos por $PO_2(L_{cont}^4)$ e das perdas nas linhas de transmissão

	λ_0	λ_1	λ_2	$PO_2(L_{cont}^4)$	$PO_1(L_{cont}^4)$
				λ_1	$Perdas(pu)$
$t_{13} - t_{14}$	1,452	1,486	1,561	1,5209	0,3036

Tabela 4.28: Valores de carregamento do intervalo t_{14} a t_{15} e obtidos por $PO_2(L_{cont}^4)$

	λ_0	λ_1	λ_2	$PO_2(L_{cont}^4)$	$PO_1(L_{cont}^4)$
				λ_1	$Perdas(pu)$
$t_{14} - t_{15}$	1,486	1,521	1,597	1,5209	-----

Tabela 4.29: Valores das variáveis de folga para identificação da 5ª contingência crítica

Restrição	Caso	Barra	d
Q_g^{sup}	7	6	2,19E-05
Q_g^{sup}	6	3	2,58E-05
Q_g^{sup}	3	8	2,94E-05
Q_g^{sup}	6	2	2,97E-05
Q_g^{sup}	6	1	3,66E-05
Q_g^{sup}	6	6	1,92E-04
Q_g^{sup}	3	3	5,29E-03
Q_g^{sup}	11	8	7,34E-03
Q_g^{sup}	11	3	8,64E-03

Tabela 4.30: Valores de carregamento para identificação da 5ª contingência crítica

Restrição	Caso	Barra	λ
Q_g^{sup}	6	8	1,596953
Q_g^{sup}	7	2	1,596962
Q_g^{sup}	3	6	1,597023

Notamos nas tabelas 4.29 e 4.30 que, tanto os valores das variáveis de folga, quanto os valores de λ são muito próximos para as contingências 6 e 7. Portanto, o problema de otimização PO_2 deve ser resolvido excluindo as contingências 6 ou 7, a fim de determinar a contingência crítica. A tabela 4.31 mostra os resultados de λ_1 obtidos através da resolução de PO_2 , onde podemos inferir que a exclusão da contingência 6 garante melhor solução para o aumento na demanda do sistema.

Tabela 4.31: Valores máximos de carregamento, obtidos por PO_2 , com a exclusão dos casos 6, 7 e 3 da lista de contingências L_{cont}^4

Contingência Excluída	PO_2 λ_1
6	1,5366
7	1,5319
3	1,5229

$$L_{cont}^5 = [3 \ 4 \ 7 \ 9 \ 10 \ 11]$$

$$L_{CC} = [1 \ 8 \ 2 \ 5 \ 6]$$

Tabela 4.32: Valores de carregamento do intervalo t_{14} a t_{15} e obtidos por $PO_2(L_{cont}^5)$ e das perdas nas linhas de transmissão

	λ_0	λ_1	λ_2	$PO_2(L_{cont}^5)$	$PO_1(L_{cont}^5)$
				λ_1	Perdas(pu)
$t_{14} - t_{15}$	1,486	1,521	1,597	1,5366	0,3239

O planejamento da operação do SEP foi realizado para todo o período de tempo considerado. Neste período, todos os requisitos operacionais foram satisfeitos, simultaneamente, para o caso base e a lista de contingências (L_{cont}^5). Algumas contingências

foram excluídas da lista de contingências inicial, pois não foi possível encontrar ações de controle que satisfizessem simultaneamente as restrições para todas as contingências. A tabela 4.33 mostra as ações de controle definidas, através da resolução do problema PO_1 , em todos os intervalos de tempo.

Tabela 4.33: Ações de controle definidas, através da resolução de PO_1 , em todos os intervalos de tempo.

Variáveis de controle	$t_0 - t_1$	$t_1 - t_2$	$t_2 - t_3$	$t_3 - t_4$	$t_4 - t_5$	$t_5 - t_6$	$t_6 - t_7$	$t_7 - t_8$
$V_g^1(pu)$	1,0943	1,0965	1,0998	1,0987	1,0991	1,0993	1,0995	1,0996
$V_g^2(pu)$	1,0606	1,0616	1,0729	1,0612	1,0601	1,0584	1,0562	1,0535
$V_g^3(pu)$	1,0184	1,0175	1,0328	1,0130	1,0093	1,0046	0,9988	0,9919
$V_g^4(pu)$	1,0280	1,0298	1,0313	1,0335	1,0357	1,0377	1,0399	1,0422
$V_g^5(pu)$	1,0219	1,0226	1,0325	1,0255	1,0275	1,0322	1,0357	1,0393
tap_{47}	0,9530	0,9524	0,9381	0,9521	0,9532	0,9604	0,9655	0,9716
tap_{49}	0,9784	0,9714	0,9625	0,9772	0,9833	0,9858	0,9930	1,0023
tap_{56}	1,0308	1,0346	1,0144	1,0442	1,0508	1,0578	1,0665	1,0765
$B_{SH}^9(pu)$	0,3325	0,3562	0,3899	0,3829	0,3883	0,3917	0,3939	0,3954
	$t_8 - t_9$	$t_9 - t_{10}$	$t_{10} - t_{11}$	$t_{11} - t_{12}$	$t_{12} - t_{13}$	$t_{13} - t_{14}$	$t_{14} - t_{15}$	
$V_g^1(pu)$	1,0996	1,0997	1,0998	1,0998	1,0999	1,0998	1,0998	
$V_g^2(pu)$	1,0502	1,0464	1,0425	1,0422	1,0372	1,0375	1,0343	
$V_g^3(pu)$	0,9840	0,9753	0,9660	0,9694	0,9589	0,9629	0,9561	
$V_g^4(pu)$	1,0445	1,0467	1,0485	1,0510	1,0445	1,0533	1,0529	
$V_g^5(pu)$	1,0436	1,0478	1,0545	1,0631	1,0665	1,0527	1,0681	
tap_{47}	0,9809	0,9910	1,0055	1,0106	1,0271	0,9962	1,0365	
tap_{49}	1,0092	1,0212	1,0417	1,0553	1,0771	1,1062	1,0803	
tap_{56}	1,0880	1,1002	1,1096	1,1105	1,1098	1,1055	1,1046	
$B_{SH}^9(pu)$	0,3966	0,3975	0,3984	0,3985	0,3988	0,3984	0,3983	

A tabela 4.34 mostra as contingências críticas de cada intervalo de tempo.

Tabela 4.34: Contingências críticas de cada intervalo de tempo.

Intervalo de tempo	L_{CC}
$t_0 - t_{11}$	-----
$t_{11} - t_{12}$	1
$t_{12} - t_{13}$	1 8
$t_{13} - t_{14}$	1 8 2 5
$t_{14} - t_{15}$	1 8 2 5 6

Cabe salientar que os dois métodos propostos, análise das variáveis de folga e FCC, indicaram a mesma contingência crítica, exceto para a 5^o contingência crítica. Para este caso, ao analisarmos a tabela 4.30, observamos que os valores de carregamento para as contingências críticas indicadas são muito próximos e, ao excluir as contingências 6 ou 7, observamos na tabela 4.31 que os valores de carregamento continuam muito próximos. Desta forma podemos constatar que os dois métodos são eficientes para identificar a contingência crítica do SEP. Contudo, a identificação da contingência crítica através dos valores das variáveis de folga é mais rápida, pois os valores das variáveis de folga já estão calculados através da resolução do problema de otimização PO_2 , o que torna este procedimento mais viável para ser aplicado em tempo real.

Seguindo o planejamento da operação do SEP, na tabela 4.34, podemos verificar em qual intervalo de tempo as contingências tornam-se críticas e, desta forma, o operador do sistema pode determinar medidas de controle emergenciais para aplicá-las se a contingência crítica ocorrer. A seção 4.4 propõe algumas alternativas para determinar estas medidas de controle.

4.4. Planejamento das ações de controle para as contingências críticas do SEP

Na seção anterior, foi visto o planejamento da operação do SEP, onde foi determinada a sequência de ações de controle que mantém o SEP com o menor risco operacional, mantendo os requisitos operacionais do sistema satisfeitos para o caso base e o maior número de contingências possível. Foram determinadas quais as contingências críticas e quais os valores de carregamento em que elas se tornam críticas, sendo assim, o operador do sistema é capaz de determinar ações de controle emergenciais, para cada intervalo de tempo, de modo a manter as restrições do SEP satisfeitas se a contingência crítica ocorrer.

Contudo, cabe salientar que, nem sempre que o gerador atinge o seu limite de geração de potência reativa ocorre uma bifurcação induzida por limites e também que os limites de geração de potência reativa não são rígidos. O limite de geração de potência reativa é uma restrição imposta pela corrente de campo do gerador, o qual pode operar por um determinado tempo, especificado pelo fabricante, acima de sua corrente nominal.

Por exemplo, considerando o intervalo de tempo em que as contingências críticas foram adicionadas à lista de contingências críticas e os controles definidos pelo problema PO_1

para o mesmo intervalo de tempo, onde o problema PO_1 foi resolvido sem a contingência crítica. Foi realizado o fluxo de carga continuado, para cada contingência crítica, e foi verificada a existência de MET para todas as contingências críticas em todos os intervalos de tempo e, portanto, se acaso a contingência crítica ocorresse, haveria algumas violações nas restrições do SEP, mas não ocorreria a instabilidade de tensão no SEP.

Por exemplo, no intervalo de tempo t_{11} a t_{12} o caso 1 foi adicionado à lista de contingências críticas, excluído da lista de contingências analisadas e em seguida o problema de otimização PO_1 foi resolvido. A resolução do problema de otimização PO_1 determinou as ações de controle para o SEP no intervalo t_{11} a t_{12} sem a contingência 1. Aplicando estas ações de controle ao caso 1 e realizando a análise do SEP, através do FCC, obtemos a curva PV ilustrada na figura 4.29.

Figura 4.29: Verificação da MET, contingência 1, com os controles definidos por $PO_1(L_{cont}^1)$ no intervalo t_{11} a t_{12}

A tabela 4.35 mostra os valores de carregamento (λ) em que os geradores atingiram seus limites.

Tabela 4.35: Valores de carregamento em que os geradores atingiram seus limites

Gerador (barra)	λ
3	1,43
8	1,44
6	1,46
2	1,53
1	1,55

Podemos verificar que a MET do sistema para a contingência 1 vai além das potências especificadas no intervalo de tempo t_{11} a t_{12} . Portanto, caso a contingência crítica (caso 1) ocorresse, haveria tempo do operador do SEP adotar medidas de controle emergenciais, alternativas as obtidas em PO_1 , a fim de restaurar o SEP e manter as restrições do sistema dentro da região factível. Estas medidas de controle emergenciais podem ser obtidas, por exemplo, com a resolução do problema de otimização PO_1 , considerando-se somente a contingência crítica.

Entretanto, supondo que alguma das contingências críticas não apresentasse MET e que esta contingência ocorra, as tensões no SEP apresentarão um contínuo e descontrolado decaimento e, caso os dispositivos de proteção do sistema não sejam capazes de atuar rapidamente o SEP entrará em colapso de tensão. Caso os dispositivos de proteção do sistema sejam capazes de atuar rapidamente, ocorrerá o corte de carga no sistema por meio da atuação destes dispositivos de proteção.

Podemos supor também que, durante determinado intervalo de tempo exista uma probabilidade muito elevada de algumas contingências críticas ocorrerem, sendo que estas contingências podem ou não apresentarem MET. A fim de evitar o colapso de tensão e/ou manter as restrições operacionais, de demanda e de segurança para essas contingências que possuem maior probabilidade, o problema de otimização PO_1 pode ser resolvido, analisando apenas o caso base e as contingências com maior probabilidade, determinando medidas de controle preventivo e aplicando-as no intervalo de tempo em questão.

O problema de otimização PO_2 pode ser resolvido para averiguar a disponibilidade dessas ações de controle. Resolvendo o problema de otimização PO_2 determina-se o valor do máximo carregamento do SEP em que é possível satisfazer as restrições operacionais, de demanda e de segurança. Por exemplo, podemos encontrar qual o valor máximo do carregamento SEP, em que é possível encontrar ações de controle que mantenham as

restrições operacionais, de demanda e de segurança satisfeitas para o caso base e uma única contingência i da lista.

A tabela 4.36 mostra os resultados dos valores máximos de carregamento obtidos por PO_2 , analisando o caso base mais a contingência i da lista de contingências, para todas as contingências.

Tabela 4.36: Valores de carregamento obtidos por PO_2 aplicado ao caso base mais contingência i

i	λ_{max}
1	1,441
2	1,485
3	1,593
4	1,597
5	1,569
6	1,534
7	1,550
8	1,460
9	1,601
10	1,602
11	1,593

O resultado obtido para λ_{max} na tabela 4.36 informa o valor máximo do carregamento em que ainda existem ações de controle para manter o SEP dentro da região factível, simultaneamente, para o caso base e a contingência i da lista.

A tabela 4.37 mostra o resultado dos valores máximos de carregamento obtidos por PO_2 , analisando somente o caso base ou a contingência i da lista de contingências.

Tabela 4.37: Valores de carregamento obtidos por PO_2 aplicado ao caso base ou contingência i

i	λ_{max}
0	1,603
1	1,495
2	1,540
3	1,599
4	1,597
5	1,579
6	1,534
7	1,591
8	1,473

9	1,602
10	1,603
11	1,600

O resultado obtido para λ_{max} na tabela 4.37 informa o valor máximo do carregamento em que ainda existem ações de controle para manter o SEP dentro da região factível, para o caso base ou uma das contingências.

Estas estratégias podem ser utilizadas para auxiliar na determinação de controles corretivos globais e também identificar quais são as contingências mais críticas do SEP.

Cabe salientar que, um SEP deve ser planejado e projetado para atender todos os requisitos que foram apresentados na tabela 2.2 do capítulo 2. Segundo os critérios do ONS, deve-se garantir que a margem de estabilidade de tensão sempre seja, no mínimo, igual ao valor mínimo de segurança especificado, para o caso de perdas de quaisquer elementos do sistema seguindo o critério N-1. Portanto, num cenário ideal, o SEP não deveria apresentar contingências críticas ao longo da operação.

4.5. Resultados do planejamento da operação do SEP minimizando o número de vezes em que as ações de controle são modificadas ao longo do dia

Conforme exposto no capítulo 3, foi proposta uma formulação alternativa (PO_3), ao problema PO_1 , para determinar as ações de controle do SEP. A resolução da formulação do problema PO_3 determina as ações de controle do SEP que maximizam a margem de carregamento do sistema mantendo os requisitos operacionais do sistema satisfeitos para o maior acréscimo de carga possível. Vimos na seção 4.1 que, durante o intervalo de tempo de t_0 a t_{11} , não existem contingências críticas no SEP.

Consideremos que no intervalo de tempo t_0 a t_{11} o operador do sistema deseje minimizar as alterações nos estados dos dispositivos controlados. Resolvendo o problema PO_3 , encontramos a solução para os estados dos dispositivos controlados do sistema que maximizam a margem de carregamento e mantêm os requisitos operacionais do sistema satisfeitos, simultaneamente para o caso base e a lista de contingências (L_{cont}^0), para o maior acréscimo de carga.

Seguindo os passos descritos no fluxograma da figura 3.16 obtém-se a sequência de ações de controle que maximizam a margem de carregamento do SEP. O problema PO_3 é, inicialmente, resolvido com as potências do SEP no instante t_0 , onde a resolução de PO_3 determinou as ações de controle que mantiveram os requisitos operacionais do sistema satisfeitos até o nível de carregamento $\lambda_{max} = 1,2868$, assegurando em $\lambda_{MET} = \lambda_{max} * 1,05 = 1,35$ que as MET sejam, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado.

Com as potências do SEP no nível de carregamento $\lambda_{max} = 1,2868$, o problema PO_3 é resolvido novamente, e assim sucessivamente até que não seja mais possível resolver o problema PO_3 , ou o intervalo de tempo entre dois λ_{max} consecutivos seja menor que um valor especificado, pois, sendo pequeno o intervalo de tempo entre os dois carregamentos, inviabilizam-se as modificações nas ações de controle. Resolvendo, novamente, o problema PO_3 determinou-se novas ações de controle que maximizaram a margem de carregamento, mantendo os requisitos operacionais satisfeitos, até o nível de carregamento $\lambda_{max} = 1,4026$.

Foi visto na seção 4.3 que, a partir do nível de carregamento $\lambda = 1,4118$ existem contingências críticas no SEP e, devido à pequena diferença entre os níveis de carregamento $\lambda_{max} = 1,4026$ e $\lambda = 1,4118$, o planejamento da operação, através da resolução do problema PO_3 , é encerrado. A média do tempo e do número de iterações da simulação para resolução do problema de otimização PO_3 com a lista de contingências inicial foi de 911 segundos (≈ 15 minutos) e 16 iterações, respectivamente.

As figuras 4.30-4.32 mostram as ações de controle, as tensões nas barras de geração, os valores dos *Tap's* dos transformadores e a compensação reativa do dispositivo *shunt*, respectivamente, determinadas na resolução do problema de otimização PO_3 , nos dois níveis de carregamentos determinados.

Figura 4.30: Valores das tensões dos geradores determinados por PO_3 para os dois níveis de carregamento

Figura 4.31: Valores dos Tap's dos transformadores determinados por PO_3 para os dois níveis de carregamento

Figura 4.32: Valores das compensações de potência reativa determinados por PO_3 para os dois níveis de carregamento

As figuras 4.33-4.36 mostram as tensões das barras de carga do SEP para o caso base e a lista de contingências.

Figura 4.33: Valores das tensões, do caso base, nas barras de carga do SEP para o aumento de carga de $\lambda = 1$ a $\lambda = 1,4026$

Figura 4.34: Valores das tensões, das contingências de 1 a 4, nas barras de carga do SEP para o aumento de carga de $\lambda = 1$ a $\lambda = 1,4026$

Figura 4.35: Valores das tensões, das contingências de 5 a 8, nas barras de carga do SEP para o aumento de carga de $\lambda = 1$ a $\lambda = 1,4026$

Figura 4.36: Valores das tensões, das contingências de 9 a 11, nas barras de carga do SEP para o aumento de carga de $\lambda = 1$ a $\lambda = 1,4026$

Podemos observar nos gráficos apresentados nas figuras 4.33-4.36 que não ocorreram violações nas restrições de tensão das barras do SEP em todas as contingências e no caso base, isto é, as tensões permaneceram dentro dos limites máximos e mínimos durante o aumento de carga de $\lambda = 1$ a $\lambda = 1,4026$. Os gráficos das figuras 4.37-4.41 mostram as potências reativas geradas de cada gerador para todos os casos analisados (caso base e contingências).

Figura 4.37: Potência reativa gerada pelo gerador 1, para todos os casos, durante o aumento na demanda de $\lambda = 1$ a $\lambda = 1,4026$

Figura 4.38: Potência reativa gerada pelo gerador 2, para todos os casos, durante o aumento na demanda de $\lambda = 1$ a $\lambda = 1,4026$

Figura 4.39: Potência reativa gerada pelo gerador 3, para todos os casos, durante o aumento na demanda de $\lambda = 1$ a $\lambda = 1,4026$

Figura 4.40: Potência reativa gerada pelo gerador 4, para todos os casos, durante o aumento na demanda de $\lambda = 1$ a $\lambda = 1,4026$

Figura 4.41: Potência reativa gerada pelo gerador 5, para todos os casos, durante o aumento na demanda de $\lambda = 1$ a $\lambda = 1,4026$

Podemos observar que os geradores também permaneceram dentro dos limites inferiores e superiores de geração de potência reativa para todas as contingências e para o caso base durante o aumento na demanda de $\lambda = 1$ a $\lambda = 1,4026$.

Para verificar a restrição de segurança de MET mínima, as figuras 4.42 - 4.48 mostram as curvas PV, da barra de carga 11, do caso base e das contingências. As curvas PV foram construídas com os controles definidos na resolução do problema de otimização PO_3 , nos dois níveis de carregamento, e com os pontos de operação obtidos através da resolução do fluxo de carga, seguindo o crescimento de carga especificado.

Novamente, a curva PV foi construída até o momento em que o crescimento de carga fizesse com que algum dos geradores atingisse o seu limite de geração de reativos ou até o ponto de máximo carregamento do sistema. Nestas figuras, a curva na cor preta representa a operação do SEP, a curva na cor azul é a continuação da curva PV, onde o final da curva azul representa o nível de carregamento referente ao valor da MET mínima de segurança especificada (5%) e a curva em vermelho é a continuação da curva PV em azul, a qual é ilustrada para mostrar o quanto as cargas do SEP podem ainda ser aumentadas além do valor da MET mínima de segurança especificada.

Figura 4.42: Verificação da existência da MET igual ou superior ao valor especificado (caso base)

Figura 4.43: Verificação da existência da MET igual ou superior ao valor especificado (contingências 1 e 2)

Figura 4.44: Verificação da existência da MET igual ou superior ao valor especificado (contingências 3 e 4)

Figura 4.45: Verificação da existência da MET igual ou superior ao valor especificado (contingências 5 e 6)

Figura 4.46: Verificação da existência da MET igual ou superior ao valor especificado (contingências 7 e 8)

Figura 4.47: Verificação da existência da MET igual ou superior ao valor especificado (contingências 9 e 10)

Figura 4.48: Verificação da existência da MET igual ou superior ao valor especificado (contingência 11)

Podemos observar que as soluções obtidas para as ações de controle, determinadas na resolução do problema de otimização PO_3 , garantem que os valores das MET sejam, no mínimo, iguais ao valor mínimo de segurança especificado para todas as contingências e para o caso base.

Através das figuras apresentadas, podemos verificar que as ações de controle, determinadas pelo problema PO_3 , mantém os requisitos operacionais do SEP satisfeitos, simultaneamente, para o caso base e a lista de contingências, durante o aumento na demanda de $\lambda = 1$ a $\lambda = 1,4026$.

Sendo assim, o planejamento da operação que determina as ações de controle que maximizam a margem de carregamento do SEP, com o objetivo de minimizar as modificações nas ações de controle, foi realizado. Observamos, através dos resultados apresentados, que a estratégia de manter os requisitos operacionais do sistema satisfeitos por mais tempo minimiza indiretamente o número de alterações nas ações de controle ao longo do dia.

A seção 4.6 compara as ações de controle, os valores das perdas nas linhas de transmissão e os níveis de tensão do SEP determinados, através da resolução dos problemas PO_1 e PO_3 , utilizando as duas estratégias para o planejamento da operação propostas nesta dissertação.

4.6. Comparação entre as duas estratégias, propostas, para o planejamento da operação do SEP

Nesta seção, os dois planejamentos propostos foram comparados. No primeiro planejamento da operação do SEP, os intervalos de tempo e de potências foram especificados

pelo operador do sistema e, através da resolução de PO_1 , as ações de controle do SEP foram determinadas, com o objetivo de reduzir as perdas nas linhas de transmissão e manter os requisitos operacionais satisfeitos. No segundo planejamento da operação do SEP, através da resolução de PO_3 , as ações de controle do SEP foram determinadas, com o objetivo de maximizar a margem de carregamento do sistema, mantendo os requisitos operacionais satisfeitos para o maior acréscimo de carga.

As figuras 4.49-4.51 comparam os estados dos dispositivos controlados, tensão de referência dos geradores, os valores dos *Tap's* dos transformadores e valores das compensações de potência reativa do dispositivo *shunt*, respectivamente, obtidos nas resoluções de PO_1 e PO_3 . As linhas contínuas e tracejadas são as ações de controle determinadas na resolução de PO_1 e PO_3 , respectivamente.

Figure 4.49: Valores das tensões dos geradores, obtidos por PO_1 e PO_3

Figura 4.50: Valores dos $Tap's$ dos transformadores, obtidos por PO_1 e PO_3

Figura 4.51: Valores das compensações de potência reativa, obtidos por PO_1 e PO_3

O gráfico da figura 4.52 compara as perdas nas linhas de transmissão, denominando como cenário 1 e 2 os cálculos das perdas com os resultados de PO_1 e PO_3 , respectivamente.

Figura 4.52: Valores das perdas nas linhas de transmissão para os dois cenários considerados

A figura 4.53 compara as tensões nas barras de carga, no caso base, entre os cenários 1 e 2.

Figura 4.53: Valores das tensões nas barras de carga para os dois cenários considerados

Analisando as figuras 4.52-4.53, devido aos objetivos e aos intervalos de tempos e de potências diferentes, podemos observar que, quanto menor o intervalo de tempo entre as ações de controle, menores são as perdas nas linhas de transmissão, mais próximas do valor nominal estão as tensões nas barras de carga e menores são as variações nas tensões provocadas pelas mudanças nos estados dos dispositivos controlados.

Por fim, cabe salientar que, o problema de otimização PO_3 também pode ser utilizado para auxiliar, o operador do sistema, na determinação dos intervalos de tempo utilizados para aplicar o problema PO_1 , pois se existem ações de controle que mantêm o SEP dentro da região factível durante o intervalo de tempo correspondente ao valor de λ_{max} obtido por PO_3 , então existe solução para os dispositivos controlados que mantêm o SEP dentro da região factível para um intervalo de tempo menor ao tempo corresponde a λ_{max} .

CAPÍTULO 5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram vistos que, durante a operação do SEP, diversos requisitos operacionais devem ser satisfeitos para garantir que a operação do SEP seja confiável, robusta e segura e, desse modo, garantir o fornecimento de energia elétrica contínuo e com qualidade aos consumidores. Vimos também a importância de assegurar MET mínima para garantir que o SEP esteja operando sem riscos a instabilidade de tensão.

Para realizar o planejamento da operação, o operador do SEP necessita determinar e impor ações de controle ao sistema para que as tensões nas barras permaneçam dentro dos níveis contratados, para que nenhum equipamento do sistema se encontre sobrecarregado e, ainda, para garantir MET igual ou superior ao valor mínimo de segurança especificado e, não obstante, esses requisitos devem continuar sendo atendidos para os casos de contingências.

Vimos também que, idealmente, a cada instante de tempo ao longo do dia, o operador do sistema deveria determinar e aplicar ações de controle ao SEP, a fim de atender aos objetivos e aos requisitos de operação. Contudo é necessário estabelecer um intervalo de tempo mínimo para que as ações de controle possam ser determinadas e impostas ao SEP.

Devido ao grande número de controles disponíveis, ao grande número de contingências, a grande dimensão dos sistemas elétricos e a presença de diferentes dispositivos de controle com custos operacionais muito distintos, torna-se fundamental o desenvolvimento de ferramentas para auxiliar o operador do SEP na tomada de decisão e planejar a operação do SEP.

Neste trabalho, uma ferramenta para realizar o planejamento da operação do SEP foi proposta. Esta ferramenta é composta por formulações, metodologias e estratégias. Vimos, no capítulo 4, os resultados do planejamento da operação do SEP utilizando esta ferramenta. Neste capítulo, são apresentadas as considerações finais e conclusões para estas formulações, metodologias e estratégias.

O problema para determinar os estados dos dispositivos controlados do SEP foi formulado como um problema de otimização. Foram desenvolvidas duas formulações principais para realizar o planejamento da operação do SEP, as quais garantem que as ações

de controle, determinadas nas resoluções do problema, mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos, incluindo a restrição de MET mínima, simultaneamente para o caso base e para a lista de contingências, durante um acréscimo de carga determinado ou especificado. Para formular o problema, realizar o planejamento e garantir que os requisitos, acima mencionados, fossem satisfeitos duas estratégias foram propostas.

A primeira estratégia realizou a divisão do período de interesse da análise em intervalos de tempo e de potência, de modo a garantir que o tempo entre um intervalo e outro seja suficiente para determinar e impor as ações de controle ao SEP.

A segunda estratégia foi a de avaliar o SEP em três níveis de carregamento consecutivos para garantir que todos os requisitos operacionais sejam satisfeitos. Utilizando a primeira e a segunda estratégia, a primeira formulação para o problema de determinação das ações de controle do SEP foi proposta.

A primeira formulação, denominada por PO_1 , determina as ações de controle do SEP que minimizam as perdas nas linhas de transmissão e mantêm os requisitos operacionais satisfeitos, simultaneamente para o caso base e para a lista de contingências, incluindo o requisito de MET mínima, durante um intervalo de tempo e de potência especificado. Utilizando a primeira formulação, o primeiro planejamento da operação do SEP foi realizado.

O primeiro planejamento da operação do SEP determina a sequência de ações de controle que minimizam as perdas nas linhas de transmissão e mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos, simultaneamente para o caso base e para todas as contingências da lista, enquanto existirem ações de controle.

Os resultados, apresentados no capítulo 4, mostraram que a estratégia de avaliar o SEP em três níveis de carregamento consecutivos é eficaz, pois os resultados mostraram que as ações de controle determinadas, na resolução do problema PO_1 , minimizaram as perdas e garantiram que os requisitos operacionais do SEP fossem sempre satisfeitos. As variáveis e as grandezas do SEP permaneceram dentro da região factível de operação e o valor da MET permaneceu, no mínimo, igual ao valor mínimo de segurança especificado pelo operador para o caso base e para todas as contingências da lista. Além disso, os resultados mostraram que o primeiro planejamento proposto para operação do SEP também é eficaz, pois garantiu que o SEP permanecesse no estado normal seguro com a sequência de ações de controle previamente determinadas para cada intervalo de tempo.

Quando não existirem mais ações de controle que satisfaçam os requisitos operacionais do SEP para o caso base e para todas as contingências da lista, ainda utilizando a primeira formulação, um segundo planejamento da operação do SEP foi proposto. O segundo planejamento consiste em determinar a sequência de ações de controle que minimizam as perdas nas linhas de transmissão e mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos para o caso base e o maior número possível de contingências da lista, minimizando o risco operacional do SEP. Para realizar o segundo planejamento da operação do SEP, foi necessário determinar as contingências do sistema e o valor de carregamento em que elas se tornam críticas, com a finalidade de minimizar o risco operacional do SEP e determinar medidas de controle emergenciais para essas contingências críticas.

Sendo assim, neste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia para identificação das contingências críticas e dos valores de carregamento em que elas se tornam críticas, esta metodologia foi dividida em duas etapas. A primeira etapa consiste em determinar as ações de controle e o valor de máximo carregamento em que é possível manter os requisitos operacionais do SEP satisfeitos para o caso base e para a lista de contingências e a segunda etapa consiste em identificar a contingência crítica.

Para realizar a primeira etapa, um terceiro problema de otimização, denominado por PO_2 , foi proposto. A segunda etapa foi realizada analisando as variáveis de folga, analisando os resultados do fluxo de carga continuado e resolvendo novamente o problema de otimização PO_2 excluindo as contingências críticas mais prováveis.

Os resultados, apresentados no capítulo 4, mostraram que a metodologia proposta é eficaz em determinar a contingência crítica e o valor de carregamento em que ela se torna crítica. Os resultados mostram que o problema de otimização PO_2 é capaz de determinar as ações de controle e o valor de máximo carregamento em que é possível manter os requisitos operacionais do SEP satisfeitos para o caso base e para a lista de contingências. Podemos verificar também a eficiência, da resolução do problema através de métodos de otimização, pois podemos notar nos valores das variáveis de folga e do fluxo de carga continuado como algumas restrições estão próximas aos seus limites, onde podemos notar a sutileza das ações de controle determinadas pelo método para satisfazer as restrições do sistema.

Os resultados mostraram que as contingências críticas podem ser identificadas através da análise dos valores das variáveis de folga ou através dos resultados do fluxo de carga continuado e, quando existirem valores muito próximos, nas variáveis de folga e nos

carregamentos determinados no FCC, o método proposto reduz a lista de opções de contingências críticas, tornando aceitável a determinação da contingência crítica através da resolução do problema PO_2 com exclusão das contingências críticas mais prováveis da lista.

Identificadas as contingências críticas e os valores de carregamento, o segundo planejamento da operação pode ser realizado, determinando a sequência de ações de controle que minimizam as perdas nas linhas de transmissão e mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos para o caso base e o maior número possível de contingências.

Finalizando, um terceiro planejamento da operação do SEP foi proposto, neste trabalho, com o objetivo de minimizar as alterações nas ações de controle do SEP ao longo do dia, enquanto existirem ações de controle que mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos para o caso base e todas as contingências da lista inicial.

Para realizar o terceiro planejamento, uma segunda formulação, denominada por PO_3 , foi proposta. A segunda formulação utiliza a estratégia de avaliação do SEP em três níveis de carregamento consecutivos e sua resolução determina as ações de controle do SEP que maximizam a margem de carregamento e mantêm os requisitos operacionais do SEP satisfeitos para o caso base e para as contingências da lista.

Os resultados, apresentados no capítulo 4, mostraram, novamente, que a estratégia de avaliar o SEP em três níveis de carregamento consecutivos é eficaz, pois os resultados mostraram que as ações de controle determinadas, na resolução do problema PO_3 , maximizaram a margem de carregamento do sistema e garantiram que os requisitos operacionais do SEP fossem sempre satisfeitos. As variáveis e as grandezas do SEP permaneceram dentro da região factível de operação e o valor da MET permaneceu, no mínimo, igual ao valor mínimo de segurança especificado pelo operador para o caso base e para todas as contingências da lista.

Além disso, os resultados mostraram que o terceiro planejamento proposto para operação do SEP também é eficaz, pois garantiu que o SEP permanecesse no estado normal seguro e as alterações nas ações de controle fossem minimizadas com a sequência de ações de controle previamente determinadas.

As duas formulações desenvolvidas para o planejamento da operação do SEP, garantem que as ações de controle, determinadas na resolução dos problemas, mantêm os requisitos operacionais, incluindo a restrição de MET mínima, do SEP satisfeitos,

simultaneamente para o caso base e para a lista de contingências, durante um acréscimo de carga determinado ou especificado.

Até onde conhecemos, essas formulações são inéditas e tendem a contribuir significativamente para o planejamento da operação do SEP. Conforme exposto no capítulo 3, a demanda do SEP apresenta um comportamento característico e é possível estimá-la ao longo do dia e, assim, o planejamento da operação pode ser realizado previamente, garantindo que os requisitos operacionais do SEP sejam sempre satisfeitos e os custos minimizados durante a operação do SEP ao longo do dia.

Cabe salientar que os tempos computacionais para resolução dos problemas propostos foram elevados, contudo a resolução para estes problemas foram obtidas utilizando a função *fmincon* do software *MatLab*, a qual utiliza variáveis simbólicas e que eleva o tempo gasto para a resolução do problema. Acredita-se que utilizar um software dedicado à otimização diminuirá o tempo gasto nas simulações, bem como utilizar outras estratégias para realizar a análise do SEP e determinar as ações de controle. A seção 5.1 apresenta as perspectivas futuras para a continuidade deste trabalho.

5.1. Perspectivas Futuras

As metodologias e formulações propostas, nesse trabalho, apresentaram resultados satisfatórios na determinação dos estados dos dispositivos controlados do SEP. Muito trabalho pode, ainda, ser realizado na área com base nos métodos e formulações apresentados. O autor pretende dar sequência aos estudos no doutorado e tem por perspectiva futura da pesquisa:

- i-* Desenvolver o método de otimização em algoritmo próprio e/ou programar o método de otimização em softwares dedicados a resolução de problemas de otimização, a fim de comparar resultados, tempos e aplicabilidade em tempo real;
- ii-* Desenvolver novas metodologias e formulações para determinação dos estados dos dispositivos controlados, tais como;
 - a.* Realizar a divisão do SEP em áreas para agilizar o processo de resolução;
 - b.* Incluir diversos custos na função objetivo do problema a ser otimizado;
 - c.* Determinar as ações de controle que minimizem o corte de carga no SEP quando não for mais possível manter o sistema seguro.
 - d.* Minimizar o número de ações de chaveamento de controle

- iii-* Desenvolvimento do método de otimização utilizando variáveis discretas e contínuas, a fim de comparar os resultados das soluções ótimas, os tempos e aplicabilidade em tempo real;

REFERÊNCIAS

- ABED, A. M. **WSCC - Voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology.** p.191-197, 1998.
- AMRANE, Y.; BOUDOUR, M.; BELAZZOUG, M. **A new hybrid technique for power systems multi-facts optimization design.** *International Transactions on Electrical Energy Systems*, v. 25, n. 11, p. 2961-2981, Nov 2015.
- AMRANE, Y. et al. **Optimal VAR control for real power loss minimization using differential evolution algorithm.** *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 66, p. 262-271, Mar 2015.
- BASU, M. **Multi-objective optimal reactive power dispatch using multi-objective differential evolution.** *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 82, p. 213-224, Nov 2016.
- CANIZARES, C. **IEEE/PES POWER SYSTEM STABILITY SUBCOMMITTEE SPECIAL PUBLICATION.** 2002
- FERREIRA, E. C. **Fluxo de potência ótimo multiobjetivo com restrições de segurança e variáveis discretas.** Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2018.
- HALACLI, M. G.; DEMIROREN, A. **Robust Voltage/VAR Control Using PSO Based STATCOM: A Case Study in Turkey.** *Electric Power Components and Systems*, v. 44, n. 8, p. 894-902, 2016.
- HUANG, G. et al. **Integration of Preventive and Emergency Responses for Power Grid Resilience Enhancement.** *IEEE Transactions on Power Systems*, USA, v. 32, n. 6, p. 4451-4463, 2017.
- JEONG, K. S.; CHUNG, J. D. **Optimal Voltage and Reactive Power Scheduling for Saving Electric Charges using Dynamic Programming with a Heuristic Search Approach.** *Journal of Electrical Engineering & Technology*, v. 11, n. 2, p. 329-337, Mar 2016.
- JINQUAN, Z. et al. **A novel preventive control approach for mitigating voltage collapse.** *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Montreal: 6 pp. p. 2006.
- LAKKIREDDY, J. et al. **Steady State Voltage Stability Enhancement Using Shunt and Series FACTS Devices.** *Conference on Clemson-University Power Systems (PSC)*, Clemson, SC. Mar 2015.
- LARKI, F. et al. **Optimal Location of STATCOM and SVC Based on Contingency Voltage Stability by Using Continuation Power Flow:Case Studies of Khouzestan Power Networks in Iran.** *2nd International Conference on Computer and Electrical Engineering*, Dubai, U ARAB EMIRATES. p.179-183, Dec 2009.

LOBATO, E. et al. **An LP- based optimal power flow for transmission losses and generator reactive margins minimization.** *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502)*, Porto, Portugal, v. 3, pp. 5 pp, 2001.

MANSOUR, M. R.; ALBERTO, L. F. C.; RAMOS, R. A. **Preventive Control Design for Voltage Stability Considering Multiple Critical Contingencies.** *IEEE Transactions on Power Systems*, USA, v. 31, n. 2, p. 1517-1525, 2016.

MANSOUR, M. R. et al. **A New and Fast Method for Preventive Control Selection in Voltage Stability Analysis.** *IEEE Transactions on Power Systems*, USA, v. 28, n. 4, p. 4448-4455, 2013.

MELIOPOULOS, A. P. S. **Power modeling, analysis and control.** [2006?]. Cap.11. Disponível em:<https://www.calvin.edu/~pribeiro/courses/Power%20Systems%20Interim/Sakis-Book/PSA_Chapter_11.pdf>. Acesso em: 02/05/2017.

MOUSAVI, O. A.; CHERKAOUI, R. **On the inter-area optimal voltage and reactive power control.** *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 52, p. 1-13, Nov 2013.

ONS. **OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO.** *Submódulo 23.3: Diretrizes e critérios para estudos elétricos*, 2011.

_____. **OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Resultados da operação : qualidade do suprimento.** Rio de Janeiro: ONS, 2018. Disponível em:<<http://www.ons.org.br/pt/paginas/resultados-da-operacao/qualidade-do-suprimento>>. Acesso em: 02/04/2017.

_____. **OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Resultados da operação : histórico da operação - curva de carga horária.** Rio de Janeiro: ONS, 2017. Disponível em:<http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/curva_carga_horaria.aspx>. Acesso em: 11/04/2018.

RAO, R. S.; RAO, V. S. **A generalized approach for determination of optimal location and performance analysis of FACTs devices.** *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 73, p. 711-724, Dec 2015.

SUJIN, P. R.; PRAKASH, T. R. D.; LINDA, M. M. **Particle Swarm Optimization Based Reactive Power Optimization.** *Journal of Computing*, 2010.

TAYLOR, C. W. **Power System Voltage Stability.** New York: 1994.

UNIVERSITY OF WASHINGTON ELECTRICAL ENGINEERING. **Power systems test case archive.** Washington, 2009. Disponível em:<<https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/>>. Acesso em: 11/04/2018.