

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Faculdade de Engenharia de Bauru

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

**UM MODELO DE FLUXO DE POTÊNCIA
ÓTIMO DESCONTÍNUO E NÃO SUAVE
COM RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA PÓS-
CONTINGÊNCIAS**

ADILSON PRETO DE GODOI

BAURU/SP

2020

ADILSON PRETO DE GODOI

**UM MODELO DE FLUXO DE POTÊNCIA
ÓTIMO DESCONTÍNUO E NÃO SUAVE
COM RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA PÓS-
CONTINGÊNCIAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” Campus de Bauru, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Edméa Cássia Baptista

Co-orientador: Prof. Dr. Leonardo Nepomuceno

BAURU/SP

2020

Godoi, Adilson Preto de.

Um modelo de Fluxo de Potência Ótimo
descontínuo e não suave com restrições de
segurança pós-contingência / Adilson Preto de
Godoi, 2020

XXX f. : il.

Orientadora: Edméa Cássia Baptista

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2020

1. Fluxo de Potência Ótimo com Restrições de
Segurança. 2. Múltiplos combustíveis. 3. Zonas de
operação proibidas. 4. Ponto de carregamento de
válvula. I. Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE ADILSON PRETO DE GODOI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 29 dias do mês de janeiro do ano de 2020, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Pós-graduação / FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof^ª. Dr^ª. EDMEA CASSIA BAPTISTA - Orientador(a) do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, Prof^ª. Dr^ª. EDILAINE MARTINS SOLER do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ANTONIO ROBERTO BALBO do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, Prof. Dr. GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Escola de Engenharia de São Carlos / USP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de ADILSON PRETO DE GODOI, intitulada **UM MODELO DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO DESCONTÍNUO E NÃO SUAVE COM RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA PÓS-CONTINGÊNCIA**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof^ª. Dr^ª. EDMEA CASSIA BAPTISTA

Prof^ª. Dr^ª. EDILAINE MARTINS SOLER

Prof. Dr. ANTONIO ROBERTO BALBO

Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Prof. Dr. GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA

Agradecimentos

Primeiramente, à Deus, por ter me guiado em toda minha vida e na realização deste trabalho.

A toda minha família, por todo apoio e incentivo durante esse trabalho.

À professora Edméa Cássia Baptista, minha orientadora, que durante todo o tempo sempre me auxiliou, orientou e principalmente teve a compreensão nos momentos que mais precisei, desse modo, muito obrigado.

Ao meu co-orientador, Leonardo Nepomuceno, que sempre esteve disponível para análises, discussões e momentos de estudos.

Aos meus professores, Antônio Roberto Balbo e Edilaine Martins Soler, que sempre me ajudaram quando precisei.

Aos colegas que conheci durante as disciplinas e todo o curso.

E a todos os funcionários da Seção Técnica de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia.

RESUMO

Após a formulação do problema de fluxo de potência ótimo por Carpentier em 1962, vários trabalhos têm sido apresentados na literatura, os quais abordam diferentes modelos para o problema de fluxo de potência ótimo. Neste trabalho destaca-se o problema de fluxo de potência ótimo com restrição de segurança, no qual são consideradas as contingências que podem ocorrer no sistema elétrico. O objetivo deste trabalho é propor um modelo, o qual ainda não tem na literatura, para o problema de fluxo de potência ótimo com restrição de segurança, ponto de carregamento de válvula, múltiplos combustíveis e zonas de operação proibida que possa ser resolvido por um método determinístico. O problema é dividido em dois estágios, as decisões de primeiro estágio são de controle preventivo, enquanto as de segundo são de controle corretivo. Ele é formulado como um problema de otimização não linear, inteiro misto, não convexo de grande porte, não diferenciável e com variáveis contínuas e inteiras 0-1. Testes numéricos foram realizados utilizando os sistemas IEEE de 30, 57 e 118 barras para o caso base, preventivo e corretivo.

Palavras-chave: Fluxo de Potência Ótimo com Restrições de Segurança, Ponto de Carregamento de Válvula, Múltiplos Combustíveis, Zonas de Operação Proibida.

ABSTRACT

After Carpentier formulated the optimal power flow problem in 1962, several studies have been presented in the literature, which address different models for the optimal power flow problem. In this work, the problem of optimal power flow with safety restriction is highlighted, in which the contingencies that may occur in the electrical system are considered. The objective of this work is to propose a model, which is not yet available in the literature, for the problem of optimal power flow with safety restriction, valve loading point, multiple fuels and prohibited operation zones that can be solved by a method deterministic. The problem is divided into two stages, the first stage decisions are of preventive control, while the second decisions are of corrective control. It is formulated as a nonlinear optimization problem, mixed integer, non-convex of large size, non-differentiable and with variables continuous and integer 0-1. Numerical tests were performed using the IEEE systems of 30, 57 and 118 bars for the base, preventive and corrective case.

Keywords: Constrained Security Optimal Power Flow, Valve Point Effect, Multiple-Fuel Option, Prohibited Zones.

Lista de Símbolos

x^0 : vetor de variáveis não controláveis do caso base;

u^0 : vetor de variáveis controláveis do caso base;

$f(x^0, u^0)$: função objetivo;

$g(x^0)$: vetor das restrições de igualdade;

$h(x^0)$: vetor das restrições de desigualdade;

V_i^0 : magnitude da tensão da barra i do caso base;

θ_i^0 : ângulo da tensão da barra i do caso base;

$P_g^{G,0}$: potência ativa gerada na barra g no caso base;

$Q_g^{G,0}$: potência reativa gerada na barra g no caso base;

$C(P_i^{G,0})$: função objetivo de custo total de geração;

G : conjunto de barras de geração do sistema;

$a_{g,m}, b_{g,m}, c_{g,m}, e_{g,m}, f_{g,m}$ coeficientes de custo da unidade geradora g para o combustível m ;

$P_g^{G,L,\max}$: limite superior de geração de potência ativa do gerador g no caso base;

$P_g^{G,L,\min}$: limite inferior de geração de potência ativa do gerador g no caso base;

ΔP_i^0 : balanço de potência ativa na barra i no caso base;

P_i^C : potência ativa consumida na barra i ;

g_{im} : condutância do ramo que liga a barra i com a barra m ;

b_{im} : susceptância do ramo im ;

ΔQ_j^0 : balanço de potência reativa na barra j no caso base;

$Q_j^{G,0}$: potência reativa gerada na barra j no caso base;

Q_j^C : potência reativa consumida na barra j no caso base;

b_j^{sh} : susceptância da barra j ;

b_{jm} : susceptância *shunt* do ramo jm ;

$Q_g^{G,L,max}$: limite superior de geração de potência reativa do gerador g no caso base;

$Q_g^{G,L,min}$: limite inferior de geração de potência reativa do gerador g no caso base;

P_{km}^0 : expressão para o fluxo de potência ativa no ramo km para o caso base;

L_{km}^L : limite do fluxo potência no ramo km no caso base;

$x^{k,s}$: variáveis não controláveis no curto prazo para a caso k ;

x^k : variáveis não controláveis para a caso k ;

$V_i^{k,s}$: magnitude de tensão de curto prazo na barra i para a caso k ;

$\theta_j^{k,s}$: ângulo da tensão de curto prazo na barra j para a caso k ;

L_{km}^S : limite do fluxo potência no ramo km no caso k no curto prazo;

V_i^k : magnitude de tensão na barra i para a caso k ;

θ_j^k : ângulo da tensão o na barra j para a caso k ;

C^k : conjunto das barras de carga para o caso k ;

B^k : conjunto de todas as barras do sistema para o caso k ;

u^k : variáveis controláveis para a caso k ;

$P_g^{G,k}$: potência ativa gerada na barra g no caso k ;

$Q_g^{G,k}$: potência reativa gerada na barra g no caso k ;

$P_g^{G,M,\max}$: limite superior de geração de potência ativa do gerador g no caso k ;

$P_g^{G,M,\min}$: limite inferior de geração de potência ativa do gerador g no caso k ;

ΔP_i^k : balanço de potência ativa na barra i no caso k ;

ΔQ_j^k : balanço de potência reativa na barra j no caso k ;

$Q_g^{G,M,\min}$: limite inferior de geração de potência reativa do gerador g no caso k ;

$Q_g^{G,M,\max}$: limite superior de geração de potência reativa do gerador g no caso k ;

P_{km}^k : expressão para o fluxo de potência ativa no ramo km para o caso k ;

L_{km}^M : limite do fluxo potência no ramo km no caso k no médio prazo.

Lista de Figuras

Figura 1 - Diagrama unifilar de um transformador com a comutação do tap do transformador sendo representada na barra k (situação a) e na barra oposta à barra k (situação b), respectivamente.....	33
Figura 2 - Sistema de 2 barras	43
Figura 3 - Despacho econômico caso base.....	43
Figura 4 - Despacho econômico preventivo.....	44
Figura 5 - Despacho econômico preventivo pós-contingência	44
Figura 6 - Despacho econômico corretivo.....	44
Figura 7 - Despacho econômico corretivo pós-contingência	45
Figura 8 - Magnitude das tensões 30 barras caso base.....	55
Figura 9 - Magnitude das tensões 30 barras caso preventivo.....	57
Figura 10 - Magnitude das tensões 30 barras caso corretivo.....	59
Figura 11 - Magnitude das tensões 57 barras caso base.....	63
Figura 12 - Magnitude das tensões 57 barras caso preventivo.....	66
Figura 13 - Magnitude das tensões 57 barras caso corretivo.....	70
Figura 14 - Magnitude das tensões 118 barras caso base.....	78
Figura 15 - Magnitude das tensões 118 barras caso preventivo	82
Figura 16 - Magnitude das tensões 118 barras caso corretivo.....	87

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dados do sistema de 2 barras	43
Tabela 2 - Coeficientes de custo do sistema elétrico de 30 barras	53
Tabela 3 - Zonas de operação proibida do sistema de 30 barras.....	53
Tabela 4 - Estado ótimo obtido para o caso base 30 barras	54
Tabela 5 - Valores obtidos para os <i>taps</i> caso base 30 barras	55
Tabela 6 – Estado ótimo para o caso preventivo 30 barras.....	56
Tabela 7 – Valores obtidos para o <i>tap</i> caso preventivo 30 barras.....	57
Tabela 8 – Estado para o caso corretivo 30 barras	58
Tabela 9 – Valores obtidos dos <i>taps</i> caso corretivo 30 barras.....	60
Tabela 10 - Coeficientes de custo do sistema elétrico de 57 barras.....	61
Tabela 11 - Zonas de operação proibida do sistema de 57 barras.....	61
Tabela 12 - Estado ótimo obtido para o caso base 57 barras	62
Tabela 13 - Valores obtidos para os <i>taps</i> caso base 57 barras	64
Tabela 14 - Estado ótimo para o caso preventivo 57 barras.....	65
Tabela 15 - Valores obtidos para os <i>taps</i> caso preventivo 57 barras	67
Tabela 16 - Estado para o caso corretivo 57 barras.....	68
Tabela 17 - Valores obtidos dos <i>taps</i> caso corretivo 57 barras	70
Tabela 18 - Coeficientes de custo do sistema elétrico de 118 barras.....	72
Tabela 19 - Zonas de operação proibida do sistema de 118 barras.....	74
Tabela 20 - Faixas dos combustíveis do sistema elétrico de 118 barras.....	74
Tabela 21 - Estado ótimo obtido para o caso base 118 barras.....	75

Tabela 22 - Valores obtidos para os taps caso base 118 barras	78
Tabela 23 - Estado ótimo para o caso preventivo 118 barras	79
Tabela 24 - Valores obtidos para os <i>taps</i> caso preventivo 118 barras.....	82
Tabela 25 – Estado ótimo para o caso corretivo 118 barras	84
Tabela 26 - Valores obtidos dos taps caso corretivo 118 barras	87
Tabela 27 - Limites dos fluxos dos ramos do sistema de 30 barras.....	95
Tabela 28 - Limites dos fluxos dos ramos do sistema de 57 barras.....	96
Tabela 29 - Limites dos fluxos dos ramos do sistema de 118 barras.....	98

Sumário

1	Introdução	17
2	Fluxo de Potência Ótimo com Restrição de Segurança - Revisão da Literatura	22
3	Modelo Proposto	28
3.1	Formulação matemática do FPO caso base.....	29
3.1.1	As variáveis do problema	30
3.1.2	A Função objetivo	30
3.1.3	Restrições de igualdade	31
3.1.4	Restrições de desigualdade	32
3.2	O problema de Fluxo de Potência Ótimo com Restrição de Segurança	35
3.2.1	A Formulação do problema de FPORS.....	36
3.2.2	As variáveis do problema	37
3.2.3	As restrições	38
3.2.4	Exemplo.....	42
3.2.5	Múltiplos combustíveis.....	45
3.2.6	Zonas de operação proibida	46
3.2.7	O modelo de FPORS com múltiplos combustíveis e zonas de operação proibidas proposto	46
4	Resultados numéricos	52
4.1	Sistema IEEE 30 barras.....	52
4.1.1	Caso base.....	52

4.1.2 30 barras preventivo.....	55
4.1.3 30 barras corretivo.....	57
4.2 Sistema IEEE 57 barras.....	60
4.2.1 Caso base.....	60
4.2.2 57 barras preventivo.....	64
4.2.3 57 barras corretivo.....	67
4.3 Sistema IEEE 118 barras.....	72
4.3.1 Caso base.....	72
4.3.2 118 barras preventivo.....	78
4.3.3 118 barras corretivo.....	83
5 Conclusões.....	89
6 Bibliografia.....	90
7 Anexo	95

1 Introdução

Com o crescente consumo de energia, é necessário manter a qualidade da energia, bem como o seu fornecimento. O sistema elétrico de transmissão está sujeito a variações súbitas de potência devido ao consumo, contingências, entre outros e necessita de ajustes das variáveis de controle a todo o momento para manter dentro dos limites operacionais seguros a magnitude de tensão e os fluxos de potência nos ramos, de modo a evitar danos físicos à rede, como também reduzir as perdas no sistema de transmissão e suprir os clientes.

Esses ajustes nos controles do sistema podem ser determinados e implementados de maneira eficiente por meio da solução de problemas Fluxo de Potência Ótimo (FPO). O problema de FPO foi formulado por Carpentier (1962) e visa otimizar uma função objetivo, satisfazendo um conjunto de restrições de igualdade e de desigualdade não lineares associado aos sistemas de geração e transmissão de energia. De forma geral, as restrições de igualdade envolvem as equações de balanço de fluxo de potência, enquanto as restrições de desigualdade envolvem os limites associados às variáveis de controle além de limites físicos e operativos do sistema elétrico. Matematicamente, o FPO é formulado, como um problema de otimização não linear, não convexo, restrito, de grande porte, e no modelo clássico, com variáveis contínuas.

Resolver esse tipo de problema consiste em encontrar um ponto de operação para o sistema elétrico de potência, o qual respeite as suas restrições e seus limites de operação e otimiza uma função objetivo. Desde sua formulação por Carpentier vários métodos de otimização têm sido investigados para resolver o problema de FPO, entre eles citamos: Sasson *et al.* (1973), Baptista *et al.* (2005), Pinheiro *et al.* (2015), entre outros.

A resolução do FPO de maneira eficaz proporciona sanar as necessidades dos centros de operação de energia elétrica, tais como: manter o padrão de qualidade para o fornecimento, planejar o fornecimento de energia elétrica e garantir a ininterrupção do serviço.

De acordo com a função objetivo e as restrições utilizadas, modelos diferentes de FPO podem ser elaborados, segundo El-Hawary (2006). A seguir, são enumerados alguns objetivos que têm sido tradicionalmente utilizados nas formulações de FPO descritas na literatura:

- Minimização das perdas ativas em todos os ramos da rede;
- Minimização dos custos de geração de potência ativa;
- Minimização dos desvios de potência ativa em relação a um perfil de despacho de referência;
- Minimização do corte de cargas.

A formulação do FPO somente com variáveis contínuas, como é o caso do modelo clássico, não retrata a situação real, em que, algumas variáveis devem ser discretas, como, por exemplo, os *taps* dos transformadores e as susceptâncias *shunt* associadas aos bancos de capacitores e reatores do sistema. No sentido de tratar a natureza discreta destas variáveis, diversos trabalhos foram desenvolvidos, dentre os quais destacam-se: Liu *et al.* (2009), Capitanescu e Wehekel (2010), Soler *et al.* (2013), entre outros.

Na formulação do FPO também pode-se levar em consideração as restrições físicas do problema como o ponto de carregamento de válvula, múltiplos combustíveis e também zonas de operações proibidas, como o trabalho de Pourakbari *et al.* (2019), pois é a formulação mais próxima da realidade de operação dos sistemas elétricos.

Os resultados obtidos pelo problema de FPO clássico, quando considerado estático, podem não ser seguros na ocorrência de certas contingências do sistema. Para isso, é necessário reformular o problema de FPO para que, além das restrições tradicionais, restrições adicionais sejam incluídas de modo a levar em conta tais contingências. Neste caso, além de atender à demanda de energia e respeitar os limites operacionais do sistema, espera-se que o FPO seja capaz de levar em consideração a segurança do sistema, que está sujeito a interrupções relacionadas a quedas de ramos de transmissão ou perda temporária de equipamentos. Um problema de FPO que seja capaz de incorporar a representação de contingências no sistema é denominado de Fluxo de Potência Ótimo com Restrição de Segurança (FPORS). Sabe-se que todo sistema está sujeito a apresentar alguma contingência a qualquer instante, de maneira que é importante que tais contingências sejam representadas de alguma forma na formulação do problema de FPORS.

A solução do FPORS fornece um ponto de operação para o sistema elétrico de potência que respeite suas restrições e limites de operação e otimize uma função objetivo e leve em consideração as contingências que podem ocorrer no sistema elétrico.

A resolução do FPORS de maneira eficaz buscar sanar algumas necessidades diárias dos operadores de centros de operação de sistema de energia elétrica, tais como: manter o padrão de qualidade para o fornecimento; planejar o fornecimento de energia elétrica; e garantir a ininterrupção do serviço, levando em consideração as contingências que podem ocorrer.

O problema de FPORS é mais desafiador do que o problema de FPO, segundo Capitanescu *et al.* (2011), pois a dimensão do problema é significativamente maior, existe a necessidade de lidar com variáveis discretas e as

restrições do problema podem ser modificadas caso haja alguma nova contingência.

A formulação do problema de FPORS utilizada neste trabalho é descrita em Capitanescu *et al.* (2011). Essa formulação pode ser entendida como um problema de dois estágios. As decisões relacionadas ao primeiro estágio são chamadas de controles preventivos, para um estado conhecido do sistema elétrico, o que impacta diretamente na função objetivo. Os controles preventivos garantem a operação do sistema elétrico mesmo quando ocorrer uma contingência, por um curto período de tempo. Por outro lado, as decisões do segundo estágio são chamadas de controles corretivos, uma vez que só são efetivamente implementados no sistema elétrico após a ocorrência da contingência, para garantir a viabilidade da operação do sistema elétrico após tal evento.

Desta forma, neste trabalho, propõe-se um modelo de FPORS que considera um conjunto de contingências para o sistema elétrico, as quais correspondem à interrupção de um dos ramos de transmissão do sistema elétrico, bem como o ponto de carregamento de válvula, múltiplos combustíveis e zonas de operações proibidas o qual possa ser resolvido por um método determinístico, neste trabalho foi utilizado o *solver KNITRO* na interface *GAMS*. Em geral, podem ser realizados estudos de seleção de contingência de modo a identificar as contingências que são potencialmente mais graves para a operação do sistema, o que não é considerado neste trabalho. Ainda que várias contingências possam ser consideradas no modelo de FPORS, supõe-se que apenas uma contingência ocorra por vez, o que é denominado de critério de segurança “N-1”, onde N é o número de ramos do sistema de potência.

No modelo proposto destacam-se as restrições físicas como o ponto de carregamento de válvula, múltiplos combustíveis, zonas de operação proibidas e

restrições de segurança no caso de ocorrer alguma contingência. Desse modo, esse modelo se torna mais próximo da realidade para um sistema elétrico.

Este trabalho encontra-se dividido da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura a respeito do problema de FPORS em relação à sua formulação e técnicas de solução, no Capítulo 3, apresenta-se a formulação matemática dos problemas de FPO, FPORS e o modelo proposto, no Capítulo 4, são apresentados os resultados numéricos envolvendo os sistemas testes IEEE 30, 57 e 118 barras. Finalmente, no Capítulo 5, apresentam-se as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 Fluxo de Potência Ótimo com Restrição de Segurança - Revisão da Literatura

Vários autores têm trabalhado com a formulação e a resolução de problemas de FPORS. Alguns destes autores limitaram-se a caracterizar as restrições de segurança do sistema como a garantia de que os fluxos de potência nos ramos de transmissão, bem como os limites das magnitudes de tensão não estejam violados.

Neste sentido, destaca-se o trabalho de Vargas *et al.* (1993) o qual propôs um método de programação linear sucessiva que consiste em resolver um problema de simulação de fluxo de potência e posteriormente, linearizar o problema de FPO, adicionando variáveis de folga às restrições de desigualdade e resolvendo-o pelo método de Karmarkar para problemas de programação linear. Esse método foi aplicado ao problema de Despacho Econômico (DE), cuja função objetivo consiste na minimização do custo de geração, sujeito às restrições de balanço de potência ativa e reativa, limites nos fluxos de potência nos ramos de transmissão e limites nas magnitudes de tensão e na geração de potência reativa.

Yan e Quintana (1997) resolveram o problema de DE com restrição de segurança, em que a função objetivo consiste em minimizar o custo de geração, sujeito às restrições de balanço de potência, limites nas gerações de potência ativa e limites nos fluxos e potência nos ramos de transmissão. Os autores utilizaram a técnica de programação linear sucessiva para a solução do problema por meio do algoritmo de ponto interior primal-dual previsor-corretor.

Outros autores seguem a linha de Capitanescu *et al.* (2011), em que após uma contingência um estágio preventivo e outro corretivo é considerado e o critério N-1 é utilizado.

Um dos primeiros autores a apresentar um trabalho abordando a segurança do sistema elétrico, foi Monticelli *et al.* (1987). Neste trabalho, os autores apresentam uma nova formulação para o problema de DE, a qual foi denominada de reprogramação do DE com restrição de segurança. No modelo apresentado pelos autores, a partir de uma determinada contingência tal como a perda de um ramo de transmissão ou um gerador, uma reprogramação deve ser efetuada para eliminar as violações causadas por tal contingência. Técnicas de decomposição são utilizadas na resolução do modelo.

Cova *et al.* (1995) apresentam uma abordagem do FPORS, cujo objetivo é determinar um ponto de operação viável ao minimizar o custo de expansão no planejamento de reativos em um primeiro momento e, posteriormente, resolver outro problema, que pode ser a minimização das perdas de potência ativa ou o máximo beneficiamento. Na resolução do primeiro problema é utilizado um algoritmo denominado SOLIS, que é baseado na projeção do gradiente e em restrições ativas. Já o segundo é resolvido por meio de um algoritmo chamado QUADRI, que utiliza a estratégia de restrições ativas e a fatoração Cholesky.

Harsan *et al.* (1997) apresentaram uma estratégia para selecionar as contingências do problema de FPO, denominada por eles de Análise de Segurança Cíclica. Esta análise é dividida em duas partes, a primeira analisa as pequenas alterações das variáveis de controle causadas pelas contingências, que não causam impacto no sistema, os quais já são eliminadas. A segunda parte analisa as contingências que sobraram, eles calculam as variações das tensões de pós-contingência através de um fluxo de carga desacoplado.

Kim *et al* (2001) resolveram um problema de fluxo de potência ótimo distribuído com restrições de segurança de forma descentralizada, ou seja, por regiões. Primeiramente é resolvido o FPO distribuído para determinar a capacidade máxima de cada ramo, e então é resolvido um FPORS regional, só na área afeta pela contingência, com o objetivo de corrigir quaisquer sobrecargas nos ramos de transmissão.

Milano *et al.* (2005) propuseram duas técnicas para inclusão de contingências no modelo de mercado. A primeira leva em consideração os ramos mais críticos do sistema no caso de ocorrência de uma contingência. Já a segunda considera o resultado do problema sem contingências, e após isso calcula uma sensibilidade para os ramos e as contingências são selecionadas por ordem de maior sensibilidade. Os autores utilizaram um método de pontos interiores primal-dual previsor-corretor na resolução do modelo apresentado.

Azevedo *et al.* (2009) propuseram uma nova formulação para o problema de FPORS, que leva em consideração a perda de ramos de transmissão, perda de geração e múltiplas perdas. A função objetivo é a de minimização das perdas de potência na transmissão e o custo de geração, sujeita às restrições de balanço de potência, limite de fluxo de potência ativa nos ramos, limites de geração e restrições de segurança relacionadas à perda de ramo ou de um gerador, estes já selecionados. Para a resolução os autores utilizam o método de pontos interiores previsor-corretor.

Capitanescu *et al.* (2011) apresentam uma revisão do modelo de FPORS, neste trabalho eles também apresentam a formulação convencional do FPORS e fazem indicações de trabalhos que podem ser realizados para complementar o desenvolvimento do problema de FPORS.

Em 2013, Zhang *et al.* (2013) propõem um método híbrido, ponto interior e evolução diferencial, para resolução do FPORS. O algoritmo é dividido em um *loop* de pesquisa global e *loop* de otimização local. O método é aplicado aos problemas IEEE de 14 e 118 barras para mostrar sua eficiência.

Amjady (2014) apresenta um modelo de FPORS considerando geradores que utilizam múltiplos combustíveis, zonas de operação proibidas e ponto de carregamento de válvula. A restrição de segurança se dá no caso preventivo e para a resolução do modelo ele aplicou uma técnica de decomposição de Benders.

Capitanescu (2015) propôs uma nova formulação para o problema de FPORS, adicionando três novas restrições ao modelo, apresentado em Capitanescu *et al.* (2011), que leva em consideração o risco de alguma contingência ocorrer. O autor utilizou o pacote CONOPT para a resolução do sistema IEEE de 118 barras, considerando quatro contingências.

No trabalho de Wang *et. al* (2015) foi desenvolvido um método que utiliza relaxação Lagrangiana, o qual incorpora na função objetivo as restrições do problema através de multiplicadores de Lagrange. Por se tratar de um problema com um grande número de variáveis, o autor utiliza a decomposição de Benders para resolver o problema relaxado, de modo que o problema é decomposto em um problema principal e um conjunto de subproblemas dependentes que interagem entre si. Este método foi aplicado no problema de FPORS, que visa minimizar o custo de geração, sujeito às restrições de atendimento de demanda, potência gerada dentro dos limites físicos, e o ajuste entre a potência gerada do caso base para uma contingência menor que um limite.

Ahmad Attarha e Nima Amjady (2016) apresentaram um estudo que tinha como objetivo modificar a característica não convexa do problema de FPORS, transformando-o em um problema convexo, para conseguir resolvê-lo com um

menor esforço computacional. Esta proposta foi aplicada ao FPORS nos sistemas de 30, 118, 300 e o sistema de 2746 barras.

Roald et al. (2017) propõem uma mudança no FPORS, os autores focaram nas ações corretivas fazendo mudanças nos transformadores defasadores e nos fluxos de potência de corrente contínua, que têm baixo custo, ao contrário do uso do redespacho de geração, que interfere no funcionamento do mercado e elevam o custo. Eles propõem um modelo que combina as contingências e também as incertezas, estas últimas relacionadas à geração de energia renovável. Os autores resolveram os sistemas IEEE de 118 e 300 barras, além do sistema polonês para mostrar a redução do custo de geração, mantendo a segurança do sistema.

Em 2018 Marcelino *et al.* propõem uma meta-heurística baseada em uma otimização de enxame de partículas evolucionárias diferenciais, um mecanismo simples de diversidade também é aplicado para evitar a convergência prematura e não encontrar a solução ótima. O método é aplicado nos sistemas elétricos IEEE de 57, 118 e 300 barras e os resultados comparados com outros métodos simples.

Park *et al.* (2019) apresentam uma outra abordagem para o FPORS, utilizando uma formulação de *tableau* esparsa, alterando a estrutura das equações da lei de Kirchhoff's, o autor resolveu os sistemas RTS96 e EPIGRIDS 1600-bus utilizando os solver *KNITRO* e *IPOPTH* na plataforma *GAMS*.

O objetivo deste trabalho é propor um modelo de Fluxo de Potência Ótimo com Restrições de Segurança que considera um conjunto de contingências para o sistema elétrico, ponto de carregamento de válvula, múltiplos combustíveis e zonas de operações proibidas o qual possa ser resolvido por um método determinístico, este modelo será nominado FPORSMCZOP (Fluxo de Potência Ótimo com Restrição de Segurança, Múltiplos Combustíveis e Zonas de Operação Proibidas).

No próximo capítulo serão apresentadas as formulações do FPO e FPORS.

3 Modelo Proposto

Um sistema elétrico de potência (SEP) é composto, basicamente, por ramos de transmissão, transformadores, unidades de cargas e unidades geradoras. O Operador Independente do Sistema (OIS) possui a responsabilidade pelo fornecimento da energia para o SEP de modo que sejam respeitados os limites físicos e operacionais dos equipamentos e que todos os consumidores sejam atendidos com qualidade. Assim, o FPO é uma ferramenta importante para o OIS, utilizada no planejamento e na operação de SEPs.

O problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) foi proposto por Carpentier (1962), e a partir dele é possível encontrar um melhor ponto de operação para o SEP, sob um determinado objetivo. Carpentier propôs um modelo matemático para o problema no qual incorporava as equações de fluxo de potência ao problema de Despacho Econômico (DE). O problema de FPO é um problema de otimização restrito, não linear, não convexo, de grande porte e com variáveis contínuas e discretas. A sua formulação tem como objetivo a otimização de uma determinada função de desempenho do SEP e as restrições geralmente envolvem, dentre outras: as equações de balanço de fluxo de potência ativa e reativa em cada barra do sistema, as restrições funcionais associadas aos limites do sistema e as restrições nas variáveis de otimização.

Neste capítulo apresenta-se a formulação do FPO caso base, do FPORS e do modelo proposto.

3.1 Formulação matemática do FPO caso base

O problema de FPO é muito investigado na Engenharia Elétrica, área de sistemas elétricos de potência. Na apresentação desse problema em (3.1) o vetor x representa as variáveis não controláveis, enquanto o vetor u , as variáveis de controle. Os índices “0” representam o caso base de operação do sistema, ou seja, a situação em que não há ocorrência de nenhuma contingência. A formulação do problema apresentado por Carpentier é dada em (3.1):

$$\begin{aligned} & \textit{Minimizar } f(x^0, u^0) \\ & \textit{sujeito a: } g_i(x^0, u^0) = 0 \quad i = 1, \dots, b \\ & \quad h_j(x^0, u^0) \leq L_j^L \quad j = 1, \dots, g \\ & \quad x_{\min}^0 \leq x^0 \leq x_{\max}^0 \\ & \quad u_{\min}^0 \leq u^0 \leq u_{\max}^0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

em que: $f(x^0, u^0)$ é a função objetivo, $g_i(x^0, u^0)$ são as restrições de balanço de potência ativa e reativa nas barras, $h_j(x^0, u^0)$ são as restrições de geração de reativo e fluxos de potência ativa nos ramos, x^0 é o vetor das variáveis não controláveis definidas pelos os ângulos das tensões em todas as barras e as magnitudes de tensões nas barras de carga e u^0 é o vetor das variáveis controláveis, definidas pela potência ativa gerada em cada barra de geração, as magnitude das tensões nas barras de geração, os *taps* dos transformadores e as susceptâncias *shunt* de bancos de capacitores e reatores, o índice L retrata o cenário de operação no longo prazo, ou seja, considerando o sistema intacto.

3.1.1 As variáveis do problema

As variáveis do problema de FPO se dividem em dois grupos: as não controláveis e as controláveis.

- As variáveis não controláveis: V_i^0 as magnitudes de tensão nas barras de carga i e θ_i^0 os ângulos de tensão em todas as barras do sistema, desse modo, tem-se $x^0 = (V_i^0, \theta_i^0)^T$;
- As variáveis controláveis: $P_i^{G,0}$ as potências geradas nas barras de geração i e referência, V_i^0 as magnitudes de tensão também nas barras de geração e referência e tap_{im}^0 o tap dos transformadores do ramo im , de modo que, $u^0 = (P_i^{G,0}, V_i^0, tap_{im}^0)^T$.

Os *shunts* de barra são considerados como fixos neste trabalho.

3.1.2 A Função objetivo

Neste trabalho, adota-se em (3.1) a função objetivo de minimização do custo de geração com os efeitos dos pontos de carregamento de válvula. Desta forma, pretende-se obter o custo mais próximo da realidade. Sendo assim, a função objetivo é definida matematicamente da seguinte maneira:

$$C(P_i^{G,0}) = \sum_{i \in G} \left[a_i (P_i^{G,0})^2 + b_i P_i^{G,0} + c_i + \left| e_i \sin(f_i (P_i^{G,L,\min} - P_i^{G,0})) \right| \right] \quad (3.2)$$

em que: $C(P_i^{G,0})$ é função objetivo de custo total de geração; G é o conjunto das unidade geradoras; $P_i^{G,0}$ é a potência gerada pela barra i , no caso pré-contingência; a_i, b_i, c_i, e_i, f_i são os coeficientes da função custo de cada gerador i ; $P_i^{G,L,\min}$ é o limite inferior de geração para o gerador i no longo prazo L .

3.1.3 Restrições de igualdade

As restrições de igualdade em (3.1) representam o balanço de potência ativa e reativa do sistema elétrico.

O balanço de potência ativa das barras de controle de reativo e de carga, é dado por:

$$\begin{aligned} \Delta P_i^0(V_i^0, \theta_i^0, tap_{iad}^0) &= P_i^{G,0} - P_i^C - \sum_{ad \in A_i} \{g_{iad} (tap_{iad}^0 V_i^0)^2 \\ - tap_{iad}^0 V_i^0 V_{ad}^0 [g_{iad} \cos(\theta_i^0 - \theta_{ad}^0) + b_{iad} \text{sen}(\theta_i^0 - \theta_{ad}^0)]\} &= 0, \end{aligned} \quad \forall i \in NB \quad (3.3)$$

em que: A_i é o conjuntos das barras adjacentes (ad) à barra i ; $P_i^{G,0}$ e P_i^C são as potências ativas geradas e consumidas na barra i , respectivamente; tap_{iad}^0 é o tap do transformador do ramo iad ; g_{iad} é a condutância do ramo iad , e b_{iad} é a susceptância do ramo iad ; NB é o conjunto de todas as barras do sistema elétrico.

O balanço de potência reativa das barras de carga é dado por:

$$\begin{aligned} \Delta Q_j^{G,0}(V_j^0, \theta_j^0, tap_{jad}^0) &= Q_j^{G,0} - Q_j^C + b_j^{sh} (V_j^0)^2 - \\ \sum_{ad \in A_j} \{-(b_{jad} + b_{jad}^{sh})(tap_{jad}^0 V_j^0)^2 - & \\ tap_{jad}^0 V_j^0 V_{ad}^0 [b_{jad} \cos(\theta_j^0 - \theta_{ad}^0) - g_{jad} \text{sen}(\theta_j^0 - \theta_{ad}^0)]\} &= 0, \end{aligned} \quad \forall j \in NBC \quad (3.4)$$

em que: $Q_j^{G,0}$ e Q_j^C são as potências reativas geradas e consumidas na barra j , respectivamente e b_{jad}^{sh} e b_j^{sh} são as susceptâncias *shunt* do ramo jad e da barra j , respectivamente; NBC é o conjunto de barras de carga do sistema elétrico.

3.1.4 Restrições de desigualdade

Estas restrições representam os limites físicos e/ou operacionais do sistema elétrico.

A geração de potência reativa injetada nas barras de controle reativo é dada por:

$$Q_j^{G,L,\min} \leq Q_j^{G,0} \leq Q_j^{G,L,\max} \quad \forall j \in G \quad (3.5)$$

em que: $Q_j^{G,L,\min}$ e $Q_j^{G,L,\max}$ são os limites inferior e superior de geração de potência reativa do gerador j , respectivamente, no longo prazo L e

$$\begin{aligned} Q_j^{G,0}(V_j^0, \theta_j^0, tap_{jad}^0) = & Q_j^C - b_j^{sh} (V_j^0)^2 + \\ & \sum_{ad \in A_j} \{-(b_{jad} + b_{jad}^{sh})(tap_{jad}^0 V_j^0)^2 \\ & - tap_{jad}^0 V_j^0 V_{ad}^0 [b_{jad} \cos(\theta_j^0 - \theta_{ad}^0) - g_{jad} \text{sen}(\theta_j^0 - \theta_{ad}^0)]\} \end{aligned} \quad (3.6)$$

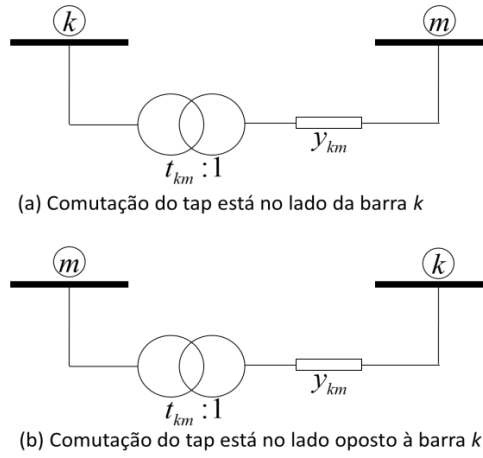
As restrições dos fluxos de potência ativa nos ramos de transmissão são:

$$-L_{km}^L \leq P_{km}^{G,0} \leq L_{km}^L \quad \forall km \in RA \quad (3.7)$$

em que: L_{km}^L é o limite do fluxo no ramo km para o caso base, no longo prazo L ; RA é o conjunto de todos os ramos do sistema elétrico.

As expressões dos fluxos de potência ativa nos ramos de transmissão variam para cada lado do transformador. Para isso, seja o modelo do transformador mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Diagrama unifilar de um transformador com a comutação do tap do transformador sendo representada na barra k (situação a) e na barra oposta à barra k (situação b), respectivamente.



Com base na Figura 1, se a comutação do tap do transformador estiver instalada do lado da barra k (conforme mostrado na situação (a)), a expressão que representa o fluxo no ramo será dado por:

$$P_k^{G,0} = g_{km} (tap_{km}^0 V_k^0)^2 - tap_{km}^0 V_k^0 V_m^0 [g_{km} \cos(\theta_k^0 - \theta_m^0) + b_{km} \text{sen}(\theta_k^0 - \theta_m^0)] \quad (3.8)$$

Ainda com base na Figura 1, se a comutação do tap do transformador estiver instalada do lado da barra oposta à barra k (conforme mostrado na situação (b)), o fluxo no ramo será dada por:

$$P_k^{G,0} = g_{km} (V_k^0)^2 - tap_{km}^0 V_k^0 V_m^0 [g_{km} \cos(\theta_k^0 - \theta_m^0) + b_{km} \text{sen}(\theta_k^0 - \theta_m^0)] \quad (3.9)$$

Caso o ramos não apresente transformador o fluxo é dado por:

$$P_k^{G,0} = g_{km} (V_k^0)^2 - V_k^0 V_m^0 [g_{km} \cos(\theta_k^0 - \theta_m^0) + b_{km} \text{sen}(\theta_k^0 - \theta_m^0)] \quad (3.10)$$

A magnitude das tensões é canalizada da seguinte maneira:

$$V_i^{L,\min} \leq V_i^0 \leq V_i^{L,\max} \quad \forall i \in NB \quad (3.11)$$

em que: $V_i^{L,\min}$ e $V_i^{L,\max}$ são os limites inferior e superior da tensão na barra i , respectivamente, no longo prazo L .

A potência gerada nas barras de geração é canalizada da seguinte maneira:

$$P_g^{G,L,\min} \leq P_g^{G,0} \leq P_g^{G,L,\max} \quad \forall g \in G \quad (3.12)$$

em que: $P_g^{G,L,\min}$ e $P_g^{G,L,\max}$ são os limites inferior e superior de geração na barra g , respectivamente, no longo prazo L .

Os *taps* dos transformadores são canalizados seguinte maneira:

$$tap_{im}^{L,\min} \leq tap_{im}^0 \leq tap_{im}^{L,\max} \quad \forall im \in RAT \quad (3.13)$$

em que: $tap_{im}^{L,\min}$ e $tap_{im}^{L,\max}$ são os limites inferior e superior dos *tap* do ramo im , respectivamente, no longo prazo L ; RAT é o conjunto de ramos do sistema elétrico com transformadores.

Na próxima seção será apresentado o problema de FPORS.

3.2 O problema de Fluxo de Potência Ótimo com Restrição de Segurança

O problema FPORS é uma importante ferramenta para os operadores dos SEP, tanto para o planejamento operacional do sistema, quanto para a precificação da energia.

Alguns SEPs operam com o sistema sobrecarregado, devido ao aumento de demanda, além do mercado de energia que possibilita a negociação de energia elétrica entre longas distâncias, da unidade geradora até o consumidor. Isso tudo contribui para um SEP inseguro, podendo ocorrer contingências, ou seja, saída de um gerador ou a queda de um ramo de transmissão. O problema de FPORS é essencial para tornar a operação do sistema mais confiável, pois pode levar em consideração todos esses problemas apresentados.

A resolução do problema de FPORS fornece um ponto ótimo de operação sob um determinado objetivo, e também ações corretivas caso ocorra alguma contingência no sistema elétrico. Nesse caso, o critério de segurança apresentado é “N-1”, ou seja, uma contingência por vez. Mediante a contingência, o conjunto de ações corretivas já está previsto, tornando um pouco mais fácil implementar esses controles corretivos.

Segundo Capitanescu *et al.* (2011) o problema de FPORS é mais desafiador do que o problema de FPO, devido a sua formulação/modelagem, a dimensão do problema, a qual gera problemas computacionais para sua resolução, a não convexidade das funções e também a quantidade de ações corretivas para os casos pós-contingências.

Apesar de todas as dificuldades apresentadas no FPORS, a ferramenta fornece um ponto de operação seguro, porém pior em termos econômicos do que o FPO.

3.2.1 A Formulação do problema de FPORS

A formulação matemática para o problema de FPORS, apresentada por Capitanescu *et al.* (2011), consiste na inclusão de novas restrições ao problema (3.1), de modo que represente a nova rede do sistema elétrico com a possível ocorrência de uma determinada contingência. Desse modo, o FPORS é descrito da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar } f(x^0, u^0) \quad (3.14)$$

$$\text{sujeito a: } g^0(x^0, u^0) = 0 \quad (3.15)$$

$$h^0(x^0, u^0) \leq L^L \quad (3.16)$$

$$g^{k,s}(x^{k,s}, u^0) = 0, \quad k = 1, \dots, c \quad (3.17)$$

$$h^{k,s}(x^{k,s}, u^0) \leq L^S, \quad k = 1, \dots, c \quad (3.18)$$

$$g^k(x^k, u^k) = 0, \quad k = 1, \dots, c \quad (3.19)$$

$$h^k(x^k, u^k) \leq L^M, \quad k = 1, \dots, c \quad (3.20)$$

$$|u^k - u^0| \leq \overline{\Delta u^k}, \quad k = 1, \dots, c \quad (3.21)$$

em que $k = 0$ é a configuração pré-contingência e $k = 1, \dots, c$ representam as c configurações de pós-contingências.

Tem-se que: $x^{k,s}$ é o vetor de variáveis dependentes para o caso preventivo pós-contingência k , que é observado em um curto período de tempo; x^k é o vetor de variáveis dependentes para o estado corretivo pós-contingência k ; u^k é o vetor de variáveis controláveis do estado corretivo pós-contingência k ; $\overline{\Delta u^k}$ é o vetor de máximos ajustes permitidos para as variáveis de controle entre o caso base e o k -ésimo estado de pós-contingência; L^S, L^M, L^L denotam, respectivamente, os limites de operação de curto (emergência), médio e longo prazos (operação

normal). Respectivamente estes limites devem satisfazer $L^L \leq L^M \leq L^S$, pois os limites suportados por um equipamento em longo prazo são menores do que os limites que ele pode suportar em curto período.

3.2.2 As variáveis do problema

Assim como no FPO, as variáveis do problema de FPORS se dividem em dois grupos: as não controláveis e as controláveis.

➤ As variáveis não controláveis do problema (3.14)-(3.21) são:

$$x^0 = (V_i^0, \theta_i^0), \forall i \in NB \quad (3.22)$$

$$x^{k,s} = (V_i^{k,s}, \theta_i^{k,s}), \forall i \in NBC^k \quad (3.23)$$

$$x^k = (V_i^k, \theta_i^k), \forall i \in NB^k \quad (3.24)$$

em que:

- ❖ $V_i^{k,s}$ é a magnitude de tensão na barra i para o caso $k, k=1, \dots, c$, no curto prazo (s vem do inglês, *short-time*);
- ❖ $\theta_i^{k,s}$ é o ângulo da tensão na barra i para o caso $k, k=1, \dots, c$, no curto prazo;
- ❖ V_i^k é a magnitude de tensão na barra i para o caso $k, k=1, \dots, c$;
- ❖ θ_i^k é o ângulo da tensão na barra i para o caso $k, k=1, \dots, c$;
- ❖ NBC^k é o conjunto das barras de carga para o caso $k, k=1, \dots, c$;
- ❖ NB^k é o conjunto de todas as barras do sistema, exceto a barra *slack*, para o caso $k, k=1, \dots, c$.

➤ As variáveis controláveis do problema (3.14)-(3.21) são:

$$u^0 = (P_g^{G,0}, V_g^0, tap_{im}^0), \forall g \in G \quad (3.25)$$

$$u^k = (P_g^{G,k}, V_g^k, tap_{im}^k), \forall g \in G \quad (3.26)$$

em que:

- ❖ $P_g^{G,k}$ é a potência ativa gerada na barra g , para o caso $k, k=1,\dots,c$;
- ❖ V_g^k é a magnitude de tensão na barra g , para o caso $k, k=1,\dots,c$;
- ❖ tap_{im}^k é o *tap* do transformador do ramo im , para o caso $k, k=1,\dots,c$;
- ❖ G é o conjunto das barras de geração para o caso $k, k=1,\dots,c$;

No problema de FPORS o índice "0" denota o caso pré-contingência, aqui chamado de caso base, já o índice " k " denota o caso pós-contingência, ou seja, a configuração do sistema não é a mesma do sistema do caso base, devido à queda de um ramo ou retirada de um gerador de operação por exemplo.

3.2.3 As restrições

As restrições (3.17)-(3.18), adicionadas ao caso base do problema de FPO apresentado em (3.1) representam as mesmas restrições (3.15)-(3.16), porém são considerados os casos de contingência, ou seja, para cada nova contingência um novo conjunto de restrições é adicionado ao problema.

Nestas restrições as variáveis u^0 são as mesmas para o caso base e caso contingenciado, quer dizer que esses controles, ao serem implementados no sistema, devem ser capazes de satisfazer tanto as restrições do caso base quanto aquelas do caso contingenciado, uma vez que os limites operacionais do sistema são ampliados, ou seja, $L^S \geq L^L$. Entretanto, ao se ampliar esses limites, o sistema pode operar pouco tempo nessas condições (*short-time*), tempo esse para que o operador do sistema possa implementar as ações corretivas.

Desse modo, os controles u^0 são denominados de preventivos, pois previnem um colapso no sistema caso ocorra uma contingência, em um curto período de tempo. Já as novas variáveis $x^{k,s}$ serão automaticamente ajustadas de modo que, após a contingência k , o sistema elétrico continue sua operação dentro da região

de factibilidade operativa. Esses novos valores dessas variáveis são diferentes de x^0 , uma vez que se trata de outro cenário, o qual considera uma contingência.

As restrições de igualdade (3.17), do problema preventivo, para a contingência k são:

- balanço de potência ativa na barra i :

✓ sendo i de geração e m de carga:

$$\begin{aligned} \Delta P_i^{k,s}(V_i^0, \theta_i^{k,s}, tap_{im}^0) &= P_i^{G,0} - P_i^C - \sum_{m \in A_i} \{g_{im} (tap_{im}^k V_i^0)^2 \\ &- tap_{im}^0 V_i^0 V_m^{k,s} [g_{im} \cos(\theta_i^{k,s} - \theta_m^{k,s}) + b_{im} \text{sen}(\theta_i^{k,s} - \theta_m^{k,s})]\} = 0 \end{aligned} \quad \forall i \in NB \quad (3.27)$$

✓ sendo i e m de carga:

$$\begin{aligned} \Delta P_i^{k,s}(V_i^{k,s}, \theta_i^{k,s}, tap_{im}^0) &= P_i^{G,0} - P_i^C - \sum_{m \in A_i} \{g_{im} (tap_{im}^k V_i^{k,s})^2 \\ &- tap_{im}^0 V_i^{k,s} V_m^{k,s} [g_{im} \cos(\theta_i^{k,s} - \theta_m^{k,s}) + b_{im} \text{sen}(\theta_i^{k,s} - \theta_m^{k,s})]\} = 0 \end{aligned} \quad \forall i \in NB \quad (3.28)$$

- balanço de potência reativa na barra j :

✓ sendo j de carga e m de geração:

$$\begin{aligned} \Delta Q_j^{k,s}(V_j^{k,s}, \theta_j^{k,s}, tap_{jm}^0) &= Q_j^{G,0} - Q_j^C + b_j^{sh} (V_j^{k,s})^2 - \\ &\sum_{m \in A_j} \{-(b_{jm} + b_{jm}^{sh})(tap_{jm}^0 V_j^{k,s})^2 - \\ &tap_{jm}^0 V_j^{k,s} V_m^0 [b_{jm} \cos(\theta_j^{k,s} - \theta_m^{k,s}) - g_{jm} \text{sen}(\theta_j^{k,s} - \theta_m^{k,s})]\} = 0 \end{aligned} \quad \forall j \in NBC \quad (3.29)$$

✓ sendo j e m de carga:

$$\begin{aligned} \Delta Q_j^{k,s}(V_j^{k,s}, \theta_j^{k,s}, tap_{jm}^0) &= Q_j^{G,0} - Q_j^C + b_j^{sh} (V_j^{k,s})^2 - \\ &\sum_{m \in A_j} \{-(b_{jm} + b_{jm}^{sh})(tap_{jm}^0 V_j^{k,s})^2 - \\ &tap_{jm}^0 V_j^{k,s} V_m^{k,s} [b_{jm} \cos(\theta_j^{k,s} - \theta_m^{k,s}) - g_{jm} \text{sen}(\theta_j^{k,s} - \theta_m^{k,s})]\} = 0 \end{aligned} \quad \forall j \in NBC \quad (3.30)$$

As restrições de desigualdade (3.18), do problema preventivo, são:

- fluxo de potência no ramo km :

$$-L_{km}^s \leq P_{km}^{k,s} \leq L_{km}^s \quad (3.31)$$

em que: L_{km}^s é o limite do fluxo no ramo km no curto prazo para a contingência k e $P_{km}^{k,s} = g_{km}(V_k^{k,s})^2 - tap_{km}^0 V_k^{k,s} V_m^{k,s} [g_{km} \cos(\theta_k^{k,s} - \theta_m^{k,s}) + b_{km} \text{sen}(\theta_k^{k,s} - \theta_m^{k,s})]$.

- magnitude de tensão canalizada da barra i :

$$V_i^{s,\min} \leq V_i^{k,s} \leq V_i^{s,\max} \quad (3.32)$$

em que: $V_i^{s,\min}$ e $V_i^{s,\max}$ são os limites inferior e superior das magnitudes de tensões, respectivamente, no curto prazo para o caso k .

As restrições (3.19)-(3.20), adicionadas ao problema também são análogas às restrições (3.15)-(3.16), respectivamente. Também é considerado o caso pós-contingência. Nessas restrições, há novas variáveis u^k . Esses controles são calculados para cada caso de contingência, e são denominados controles corretivos, já que são utilizados para corrigir a operação, deixando o sistema factível dentro do médio prazo. Assim, tem-se que $L^s \geq L^M \geq L^L$, ou seja, os limites de médio prazo devem ser menores que os de curto prazo e maiores que os de longo prazo. As variáveis não controláveis x^k são calculadas juntamente com as variáveis controláveis u^k .

As restrições de igualdade (3.19), do problema corretivo, são:

- balanço de potência ativa na barra i :

$$\begin{aligned} \Delta P_i^k(V_i^k, \theta_i^k, tap_{im}^k) &= P_i^{G,k} - P_i^C - \sum_{m \in A_i} \{g_{im} (tap_{im}^k V_i^k)^2 \\ &- tap_{im}^k V_i^k V_m^k [g_{im} \cos(\theta_i^k - \theta_m^k) + b_{im} \text{sen}(\theta_i^k - \theta_m^k)]\} = 0 \quad \forall i \in NB \end{aligned} \quad (3.33)$$

- balanço de potência reativa na barra j :

$$\begin{aligned} \Delta Q_j^k(V_j^k, \theta_j^k, tap_{jm}^k) &= Q_j^{G,k} - Q_j^C + b_j^{sh} (V_j^k)^2 - \\ &\sum_{m \in A_j} \{-(b_{jm} + b_{jm}^{sh})(tap_{jm}^k V_j^k)^2 - \\ &tap_{jm}^k V_j^k V_m^k [b_{jm} \cos(\theta_j^k - \theta_m^k) - g_{jm} \text{sen}(\theta_j^k - \theta_m^k)]\} = 0 \quad \forall j \in NBC \end{aligned} \quad (3.34)$$

As restrições de desigualdade (3.20), do problema corretivo, são:

- geração de potência reativa na barra g :

$$Q_g^{G,m,\min} \leq Q_g^{G,k} \leq Q_g^{G,m,\max} \quad \forall g \in G \quad (3.35)$$

em que:

$$\begin{aligned} Q_g^{G,k}(V_g^k, \theta_g^k, tap_{gm}^k) &= Q^C - b_g^{sh}(V_g^k)^2 + \sum_{m \in A_g} \{-(b_{gm} + b_{gm}^{sh})(tap_{gm}^k V_g^k)^2 \\ &+ tap_{gm}^k V_g^k V_m^k [b_{gm} \cos(\theta_g^k - \theta_m^k) - g_{gm} \text{sen}(\theta_g^k - \theta_m^k)]\} \end{aligned} \quad (3.36)$$

- fluxo de potência no ramo km :

$$-L_{km}^m \leq P_{km}^k \leq L_{km}^m \quad \forall km \in RA^k \quad (3.37)$$

em que: L_{km}^m é o limite do fluxo no ramo km para o médio prazo para a contingência k , com os limites aumentados para o médio prazo m , RA^k é o conjunto de ramos pós-contingência e

$$P_{km}^k = g_{km}(V_k^k)^2 - tap_{km}^k V_k^k V_m^k [g_{km} \cos(\theta_k^k - \theta_m^k) + b_{km} \text{sen}(\theta_k^k - \theta_m^k)].$$

- tensão canalizada da barra i :

$$V_i^{m,\min} \leq V_i^k \leq V_i^{m,\max} \quad \forall i \in NBC^k \quad (3.38)$$

em que: $V_i^{m,\min}$ e $V_i^{m,\max}$ são os limites inferior e superior das magnitudes tensões, respectivamente, para o caso k .

- potência gerada na barra g :

$$P_g^{G,m,\min} \leq P_g^{G,k} \leq P_g^{G,m,\max} \quad \forall g \in G \quad (3.39)$$

em que: $P_g^{G,m,\min}$ e $P_g^{G,m,\max}$ são os limites inferior e superior de geração na barra g , respectivamente para o caso k .

- $taps$ dos transformadores no ramo im :

$$tap_{im}^{M,\min} \leq tap_{im}^k \leq tap_{im}^{M,\max} \quad \forall im \in RAT^k \quad (3.40)$$

em que: $tap_{im}^{M,\min}$ e $tap_{im}^{M,\max}$ são os limites inferior e superior dos tap do ramo im , respectivamente, para o caso k ; RAT^k é o conjunto de ramos do sistema elétrico com transformadores para o caso k .

A restrição (3.21) é denominada restrição de acoplamento, o objetivo dessa restrição é garantir que os ajustes entre o caso base e o pós-contingência sejam realistas, ou seja, para que o operador não seja obrigado a tomar ações de controle que alterem de forma considerável o ponto de operação básico.

As restrições (3.21), as quais são utilizadas para prevenir ajustes irreais das variáveis de controle entre o caso base e o caso pós-contingência, são dadas por:

$$|P_g^{G,k} - P_g^{G,0}| \leq \Delta P^G \quad \forall g \in G \quad (3.41)$$

$$|V_i^k - V_i^0| \leq \Delta V \quad \forall i \in NB \quad (3.42)$$

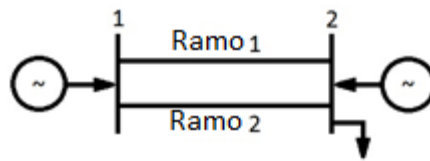
$$|tap_{im}^k - tap_{im}^0| \leq \Delta tap \quad \forall im \in RAT^k \quad (3.43)$$

Desse modo, é possível definir o problema de FPO tradicional para o caso base utilizando-se apenas as restrições (3.14)-(3.16). O FPORS para o caso preventivo é definido se forem utilizadas somente as restrições (3.14)-(3.18). Finalmente, o caso geral preventivo/corretivo pode ser definido se forem representadas todas as restrições (3.14)-(3.21).

3.2.4 Exemplo

Este exemplo é apresentado por Monticelli *et al.* (1987), e será utilizado para ilustrar o problema de FPORS. Considere o sistema da Figura 2, com uma carga de 200MW na barra 2.

Figura 2 - Sistema de 2 barras



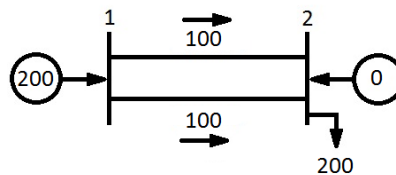
Os dados do sistema são apresentados na Tabela 1. O objetivo é a minimização do custo de geração.

Tabela 1 - Dados do sistema de 2 barras

Gerador	1	2
Ger. Min	50	0
Ger. Máx	200	120
Custo \$/MW	1	2
Rampa	40MW	35MW
Ramos	1	2
Limite Máx.	100	200

Na análise da Tabela 1 o menor custo de geração é o da barra 1, desse modo, o despacho seria o caso base, sem segurança. Obtendo o seguinte resultado:

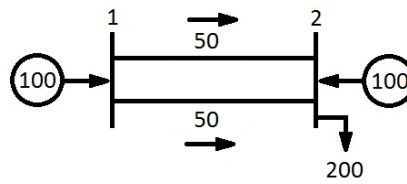
Figura 3 - Despacho econômico caso base



O custo total de operação será de \$ 200, conforme a Figura 3.

Resolver o mesmo problema e considerar uma contingência, isto é, uma possível queda do ramo 2, a qual tem maior capacidade. Tem-se o caso preventivo. Este caso garante a operação do sistema mesmo com uma possível interrupção do ramo 2, sem violar os limites físicos do sistema. Desse modo, o despacho, ainda sem a interrupção do ramo 2, será dado por:

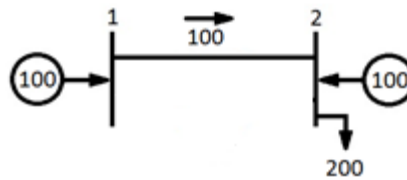
Figura 4 - Despacho econômico preventivo



A Figura 4 mostra que o despacho será de 100MW para cada gerador, o que eleva o custo total para \$ 300, pois o custo é de \$2/MW no gerador 2 e \$1/W no gerador 1.

Caso ocorra a contingência, o sistema passará a ter a seguinte topologia:

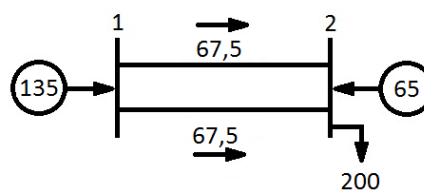
Figura 5 - Despacho econômico preventivo pós-contingência



Porém, o caso preventivo não considera os ajustes que o operador pode fazer caso ocorra à contingência, no caso será considerado as rampas dos geradores, ou seja, as potências que podem ser aumentadas ou diminuídas nos geradores (40MW para o gerador 1 e 35MW para o gerador 2), esses ajustes serão implementados pelo operador caso ocorra a contingência da queda de uma dos ramos. Esse caso é o corretivo, que permite a correção para que o sistema continue operando.

Desse o modo o despacho, ainda sem a interrupção do ramo 2, é dado da seguinte maneira:

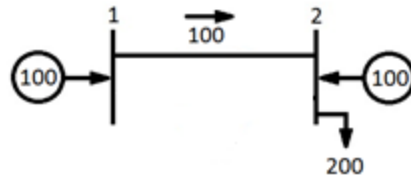
Figura 6 - Despacho econômico corretivo



Na Figura 6, o custo total é de \$ 265. Também é possível verificar que mesmo com a interrupção de uma dos ramos, os geradores podem ser redespachados, isto é, o gerador 1 de 135MW para 100MW, e o gerador 2 de 65MW para 100MW, respectivamente, para continuar a operação do sistema sem nenhum problema.

Caso ocorra a contingência, o sistema passará a ter a seguinte topologia:

Figura 7 - Despacho econômico corretivo pós-contingência



3.2.5 Múltiplos combustíveis

No problema de FPORS pode-se ainda levar em consideração que os geradores podem trabalhar com diferentes tipos de combustíveis o que resulta em diferentes coeficientes de custo para cada gerador.

No caso de problemas de FPORS com múltiplos combustíveis a função objetivo é construída por partes como em Pourakbari *et al.* (2019), ou seja,

$$C(P_i^{G,0}) = \begin{cases} a_{i,1}(P_i^{G,0})^2 + b_{i,1}P_i^{G,0} + c_{i,1} + |e_{i,1} \text{sen}(f_{i,1}(P_i^{G,L,\min} - P_i^{G,0}))| & \text{para o combustível 1 ou} \\ a_{i,2}(P_i^{G,0})^2 + b_{i,2}P_i^{G,0} + c_{i,2} + |e_{i,2} \text{sen}(f_{i,2}(P_i^{G,L,\min} - P_i^{G,0}))| & \text{para o combustível 2 ou} \\ \vdots \\ a_{i,m}(P_i^{G,0})^2 + b_{i,m}P_i^{G,0} + c_{i,m} + |e_{i,m} \text{sen}(f_{i,m}(P_i^{G,L,\min} - P_i^{G,0}))| & \text{para o combustível } m \end{cases} \quad (3.44)$$

em que $a_{i,m}, b_{i,m}, c_{i,m}, e_{i,m}, f_{i,m}$ são os coeficientes de custo de cada gerador i para o combustível m .

Os geradores possuem faixas de geração para cada tipo de combustível, desse modo dependendo da potência gerada o combustível adequado é selecionado, ou seja:

$$\begin{aligned}
& \text{Combustível 1, se } P_{i,1}^{G,\min} \leq P_i^k \leq P_{i,1}^{G,\max} \\
& \text{Combustível 2, se } P_{i,2}^{G,\min} \leq P_i^k \leq P_{i,2}^{G,\max} \quad \forall i, i \in G \\
& \quad \vdots \\
& \text{Combustível } m, \text{ se } P_{i,m}^{G,\min} \leq P_i^k \leq P_{i,m}^{G,\max}
\end{aligned} \tag{3.45}$$

em que: $P_{i,m}^{G,\min}$ e $P_{i,m}^{G,\max}$ são os limites inferior e superior de cada combustível m para cada gerador i , respectivamente.

3.2.6 Zonas de operação proibida

Devido às restrições físicas como: altas temperaturas nas caldeiras térmicas, vibrações mecânicas nos mancais do eixo, entre outros, é necessário fazer com que os geradores evitem operar em certas zonas de geração, ou seja, zonas de operação proibidas. Nesse trabalho consideram-se as zonas de operação permitidas (*OZ*). Essa restrição é incorporada ao problema de FPO da seguinte maneira:

$$P_i^G = \begin{cases} P_i^{G,l_1} \leq P_i^G \leq P_i^{G,u_1} \text{ ou} \\ P_i^{G,l_2} \leq P_i^G \leq P_i^{G,u_2} \text{ ou} \\ \quad \vdots \\ P_i^{G,l_{oz}} \leq P_i^G \leq P_i^{G,u_{oz}} \end{cases} \quad \forall i \tag{3.46}$$

em que: $P_i^{G,l_{oz}}$ e $P_i^{G,u_{oz}}$ são os limites inferiores e superiores de cada zona de operação (*OZ*) do gerador i , respectivamente.

3.2.7 O modelo de FPORS com múltiplos combustíveis e zonas de operação proibidas proposto

Para a função objetivo do problema de FPORS apresentado anteriormente, (3.44), não é possível resolver o FPORS por um método determinístico. Assim, a

função objetivo será reescrita, com a finalidade de fazer o tratamento da não diferenciabilidade da função objetivo, neste trabalho, a função objetivo será escrita da seguinte maneira:

$$\text{Min } C(P_i^{G,0}) = \sum_{i=1}^G \sum_{m=1}^M (a_{i,m} (P_i^{G,0})^2 + b_{i,m} P_i^{G,0} + c_{i,m} + e_{i,m} \text{mod}_{i,m}) \text{alfa}_{i,m} \quad (3.47)$$

em que: $\text{alfa}_m \in \{0,1\}$, M é quantidade de combustíveis do gerador i , e o termo modular é substituído por uma variável mod como em Pinheiro *et al.* (2019) e são incluídas novas restrições:

$$\begin{aligned} \text{sen}(f_{i,m}(P_i^{G,L,\min} - P_i^{G,0})) - \text{mod}_{i,m} &\leq 0 \\ -\text{sen}(f_{i,m}(P_i^{G,L,\min} - P_i^{G,0})) - \text{mod}_{i,m} &\leq 0 \end{aligned} \quad \forall i \in G, \forall m \in M \quad (3.48)$$

As restrições (3.49) e (3.50) são incluídas no modelo para selecionar o combustível de operação, fazendo a seleção correta da função custo a ser considerada:

$$\sum_{m=1}^M \text{alfa}_{i,m} P_{i,m}^{G,\min} \leq P_i^{G,0} \leq \sum_{m=1}^M \text{alfa}_{i,m} P_{i,m}^{G,\max}, \quad \forall i \in G \quad (3.49)$$

$$\sum_{m=1}^M \text{alfa}_{i,m} = 1, \quad \forall i \in G \quad (3.50)$$

em que: $P_{i,m}^{G,\min}$ e $P_{i,m}^{G,\max}$ são os limites inferiores e superiores da potência para o combustível m do gerador i , respectivamente, e $\text{alfa}_{i,m}$ é uma variável binária para selecionar o combustível m do gerador i .

Para tratar as restrições de zonas de operação proibidas (3.46) também utilizam-se variáveis binárias, conforme segue:

$$\sum_{oz=1}^{NOZ} \text{beta}_{i,oz}^0 P_i^{G,\min_{oz}} \leq P_i^{G,0} \leq \sum_{oz=1}^{NOZ} \text{beta}_{i,oz}^0 P_i^{G,\max_{oz}}, \quad \forall i \in G \quad (3.51)$$

$$\sum_{oz=1}^{NOZ} \text{beta}_{i,oz}^0 = 1, \quad \forall i \in G \quad (3.52)$$

em que: $\beta_{i,oz} \in \{0,1\}$ fará com que a potência gerada esteja sempre dentro das zonas de operação permitidas (*NOZ*), $P_i^{G,\min_{oz}}$ e $P_i^{G,\max_{oz}}$ são os limites inferior e superior da potência para a zona de operação *oz* do gerador *i*, respectivamente.

A formulação completa do problema de FPORMCZOP com todas as modificações e manipulações algébricas apresentadas propostas neste trabalho é dada da por:

$$\text{Min } C(P_i^{G,0}) = \sum_{i=1}^G \sum_{m=1}^M (a_{i,m} (P_i^{G,0})^2 + b_{i,m} P_i^{G,0} + c_{i,m} + e_{i,m} \text{ mod}_{i,m}) \alpha_{i,m} \quad (3.53)$$

s.a.:

$$\begin{aligned} \Delta P_i^0(V_i^0, \theta_i^0, \text{tap}_{iad}^0) &= P_i^{G,0} - P_i^C - \\ \sum_{ad \in A_i} \{g_{iad} (\text{tap}_{iad}^0 V_i^0)^2 - \text{tap}_{iad}^0 V_i^0 V_{ad}^0 [g_{iad} \cos(\theta_i^0 - \theta_{ad}^0) + b_{iad} \text{sen}(\theta_i^0 - \theta_{ad}^0)]\} &= 0 \end{aligned} \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_j^{G,0}(V_j^0, \theta_j^0, \text{tap}_{jad}^0) &= Q_j^{G,0} - Q_j^C + b_j^{sh} (V_j^0)^2 - \\ \sum_{ad \in A_j} \{-(b_{jad} + b_{jad}^{sh})(\text{tap}_{jad}^0 V_j^0)^2 - \\ \text{tap}_{jad}^0 V_j^0 V_{ad}^0 [b_{jad} \cos(\theta_j^0 - \theta_{ad}^0) - g_{jad} \text{sen}(\theta_j^0 - \theta_{ad}^0)]\} &= 0 \end{aligned} \quad (3.55)$$

$$Q_j^{G,L,\min} \leq Q_j^{G,0} \leq Q_j^{G,L,\max} \quad (3.56)$$

$$-L_{km}^L \leq P_{km}^{G,0} \leq L_{km}^L \quad (3.57)$$

$$V_i^{L,\min} \leq V_i^0 \leq V_i^{L,\max} \quad (3.58)$$

$$P_g^{G,L,\min} \leq P_g^{G,0} \leq P_g^{G,L,\max} \quad (3.59)$$

$$\text{tap}_{im}^{L,\min} \leq \text{tap}_{im}^0 \leq \text{tap}_{im}^{L,\max} \quad (3.60)$$

$$\sum_{oz=1}^{NOZ} \beta_{i,oz}^0 P_i^{G,\min_{oz}} \leq P_i^{G,0} \leq \sum_{oz=1}^{NOZ} \beta_{i,oz}^0 P_i^{G,\max_{oz}}, \forall i \quad (3.61)$$

$$\sum_{oz=1}^{NOZ} \beta_{i,oz}^0 = 1, \forall i \quad (3.62)$$

$$\sum_{m=1}^M \alpha_{i,m} = 1, \forall i \quad (3.63)$$

$$\sum_{m=1}^M \text{alfa}_{i,m} P_{i,m}^{G,\min} \leq P_i^{G,0} \leq \sum_{m=1}^M \text{alfa}_{i,m} P_{i,m}^{G,\max}, \forall i \quad (3.64)$$

$$\begin{aligned} \text{sen}(f_{i,m}(P_i^{G,L,\min} - P_i^{G,0})) - \text{mod}_{i,m} &\leq 0 \\ -\text{sen}(f_{i,m}(P_i^{G,L,\min} - P_i^{G,0})) - \text{mod}_{i,m} &\leq 0 \end{aligned} \quad (3.65)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_i^{k,s}(V_i^{k,s}, \theta_i^{k,s}, \text{tap}_{im}^0) &= P_i^{G,0} - P_i^C - \\ \sum_{m \in A_i} \{g_{im} (\text{tap}_{im}^0 V_i^{k,s})^2 - & \\ \text{tap}_{im}^0 V_i^{k,s} V_m^{k,s} [g_{im} \cos(\theta_i^{k,s} - \theta_m^{k,s}) + b_{im} \text{sen}(\theta_i^{k,s} - \theta_m^{k,s})]\} &= 0 \end{aligned} \quad (3.66)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_j^{k,s}(V_j^{k,s}, \theta_j^{k,s}, \text{tap}_{jm}^0) &= Q_j^{G,0} - Q_j^C + b_j^{sh} (V_j^{k,s})^2 - \\ \sum_{m \in A_j} \{-(b_{jm} + b_{jm}^{sh})(\text{tap}_{jm}^0 V_j^{k,s})^2 - & \\ \text{tap}_{jm}^0 V_j^{k,s} V_m^{k,s} [b_{jm} \cos(\theta_j^{k,s} - \theta_m^{k,s}) - g_{jm} \text{sen}(\theta_j^{k,s} - \theta_m^{k,s})]\} &= 0 \end{aligned} \quad (3.67)$$

$$-L_{km}^s \leq P_{km}^{k,s} \leq L_{km}^s \quad (3.68)$$

$$V_i^{s,\min} \leq V_i^{k,s} \leq V_i^{s,\max} \quad (3.69)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_i^k(V_i^k, \theta_i^k, \text{tap}_{im}^k) &= P_i^{G,k} - P_i^C - \\ \sum_{m \in A_i} \{g_{im} (\text{tap}_{im}^k V_i^k)^2 - \text{tap}_{im}^k V_i^k V_m^k & \\ [g_{im} \cos(\theta_i^k - \theta_m^k) + b_{im} \text{sen}(\theta_i^k - \theta_m^k)]\} &= 0 \end{aligned} \quad (3.70)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_j^k(V_j^k, \theta_j^k, \text{tap}_{jm}^k) &= Q_j^{G,k} - Q_j^C + b_j^{sh} (V_j^k)^2 - \\ \sum_{m \in A_j} \{-(b_{jm} + b_{jm}^{sh})(\text{tap}_{jm}^k V_j^k)^2 - & \\ \text{tap}_{jm}^k V_j^k V_m^k [b_{jm} \cos(\theta_j^k - \theta_m^k) - g_{jm} \text{sen}(\theta_j^k - \theta_m^k)]\} &= 0 \end{aligned} \quad (3.71)$$

$$Q_g^{G,m,\min} \leq Q_g^{G,k} \leq Q_g^{G,m,\max} \quad (3.72)$$

$$-L_{km}^m \leq P_{km}^k \leq L_{km}^m \quad (3.73)$$

$$V_i^{m,\min} \leq V_i^k \leq V_i^{m,\max} \quad (3.74)$$

$$P_g^{G,m,\min} \leq P_g^{G,k} \leq P_g^{G,m,\max} \quad (3.75)$$

$$\text{tap}_{im}^{M,\min} \leq \text{tap}_{im}^k \leq \text{tap}_{im}^{M,\max} \quad (3.76)$$

$$\sum_{oz=1}^{NOZ} \text{beta}_{i,oz}^k P_i^{G,\min_{oz}} \leq P_i^{G,0} \leq \sum_{oz=1}^{NOZ} \text{beta}_{i,oz}^k P_i^{G,\max_{oz}}, \forall i \quad (3.77)$$

$$\sum_{oz=1}^{NOZ} \beta_{i,oz}^k = 1, \forall i \quad (3.78)$$

$$|P_g^{G,k} - P_g^{G,0}| \leq \Delta P^G \quad (3.79)$$

$$|V_i^k - V_i^0| \leq \Delta V \quad (3.80)$$

$$|tap_{im}^k - tap_{im}^0| \leq \Delta tap \quad (3.81)$$

$$\beta_{i,oz}^0, \beta_{i,oz}^k, \alpha_{i,m} \in \{0,1\} \quad (3.82)$$

No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a implementação computacional do modelo, mostrando a sua viabilidade e robustez.

4 Resultados numéricos

Os problemas com ponto de carregamento de válvula, zonas de operações proibidas e múltiplos combustíveis foram resolvidos através do pacote de otimização *KNITRO* de Waltz e Platenga (2010) em interface com a plataforma *GAMS*, em todos os casos foram considerados os *taps* dos transformadores como variáveis contínuas. Nos problemas de FPORS resolvidos neste capítulo a função objetivo é dada como na equação (3.53). Os testes foram realizados em um computador com processador Intel Core i5, 4gb de RAM, foram utilizados os sistemas IEEE de 30, 57 e 118 barras, cada teste foi realizado da seguinte maneira: inicialmente resolveu-se o caso base, depois disso os casos de controle preventivo e corretivo.

4.1 Sistema IEEE 30 barras

4.1.1 Caso base

Os dados do sistema elétrico IEEE 30 barras, foram obtidos em <https://matpower.org/#docs> (acessado em 08/07/2019). Este sistema elétrico possui:

- 30 barras;
- 41 ramos de transmissão;
- 6 geradores;
- 4 transformadores com controle de *taps*;

O problema de FPO caso base envolve somente as restrições (3.54)-(3.65), considerando ponto de carregamento de válvula, múltiplos combustíveis e zonas de operação proibida.

Os coeficientes da função objetivo (3.53), que representam os custos de geração de cada gerador, são fornecidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes de custo do sistema elétrico de 30 barras

Barra	a	b	c	e	f	$P_{i,m}^{\min}$	$P_{i,m}^{\max}$
1	0,005	0,7	55	50	0,063	0,50	1,40
	0,0075	1,05	82,5	50	0,063	1,40	2,00
3	0,01	0,3	40	40	0,098	0,20	0,55
	0,02	0,6	80	40	0,098	0,55	0,80
5	0,0625	1	0	0	0	0,10	0,50
8	0,00834	3,25	0	0	0	0,10	0,35
11	0,025	3	0	0	0	0,10	0,30
13	0,025	3	0	0	0	0,12	0,40

Fonte: Boucekara (2018)

Na Tabela 3 são apresentadas as zonas de operação proibida do sistema elétrico de 30 barras.

Tabela 3 - Zonas de operação proibida do sistema de 30 barras

Barra	P_i^{G,\min_1}	P_i^{G,\max_1}	P_i^{G,\min_2}	P_i^{G,\max_2}
1	0,55	0,66	0,80	1,20
3	0,21	0,24	0,45	0,55
5	0,30	0,36	-	-
8	0,25	0,30	-	-
11	0,25	0,28	-	-
13	0,24	0,30	-	-

Fonte: Boucekara (2018)

Neste teste, as magnitudes das tensões são canalizadas na região $0,94 \leq V_i^0 \leq 1,06$, em todas as barras, os *taps* dos transformadores são canalizados por $0,9 \leq tap_{km}^0 \leq 1,1 pu$.

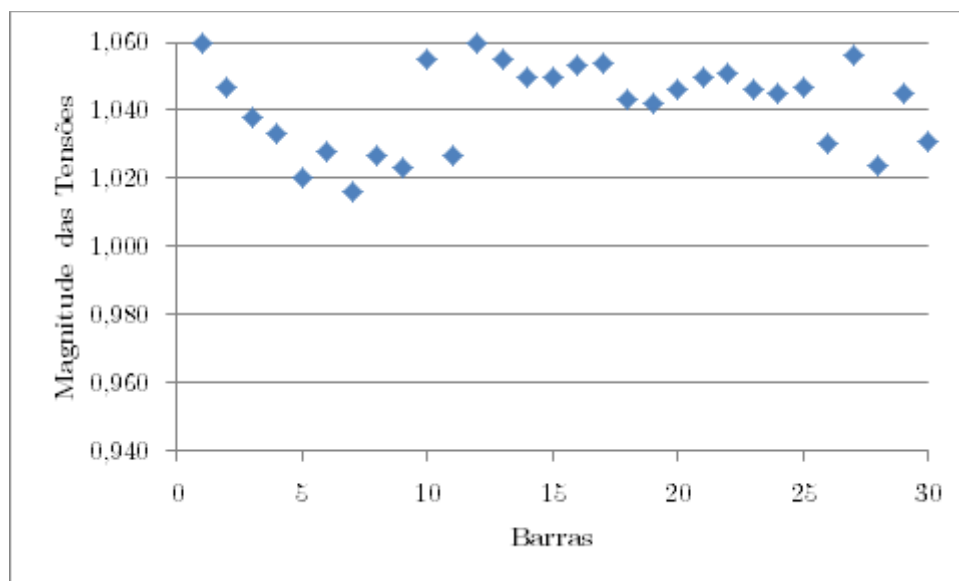
O resultado obtido a partir da resolução do problema de FPORS caso base pelo solver de otimização *KNITRO*, é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Estado ótimo obtido para o caso base 30 barras

Barra	V_i	P_i^G
1	1,060	1,349
2	1,047	0,800
3	1,038	-
4	1,033	-
5	1,020	0,232
6	1,028	-
7	1,016	-
8	1,027	0,200
9	1,023	-
10	1,055	-
11	1,027	0,128
12	1,060	-
13	1,055	0,200
14	1,050	-
15	1,050	-
16	1,053	-
17	1,054	-
18	1,043	-
19	1,042	-
20	1,046	-
21	1,050	-
22	1,051	-
23	1,046	-
24	1,045	-
25	1,047	-
26	1,030	-
27	1,056	-
28	1,024	-
29	1,045	-
30	1,031	-

A Figura 8 apresenta a magnitude das tensões dentro dos limites.

Figura 8 - Magnitude das tensões 30 barras caso base



O valor da função objetivo obtido calculado é de \$ 714,60, o método convergiu em um tempo de computação de 0,047s.

Na Tabela 5 estão os valores calculados para os *taps* dos transformadores.

Tabela 5 - Valores obtidos para os *taps* caso base 30 barras

Ramo	tap_{im}^0
6-9	0,929
6-10	1,100
4-12	1,004
28-27	1,043

4.1.2 30 barras preventivo

Para o caso preventivo foi considerada uma contingência no ramo 12-15, ou seja, o ramo de transmissão que conecta a barra 12 a barra 15.

Nesse caso os limites dos fluxos nos ramos de transmissão (L_i) são considerados maiores do que o caso base e são apresentados no Anexo. A formulação do caso preventivo considera apenas as restrições (3.54)-(3.69), ou seja, além das restrições do caso base, são acrescentadas as restrições de balanço

de potência ativa e reativa, de fluxo de potência nos ramos de transmissão e os limites operacionais de curto prazo para o sistema com uma contingência.

Neste caso, as variáveis são denominadas de controles preventivos, pois quando ocorrer à contingência o operador não precisa tomar nenhuma providência, uma vez que os controles ótimos já calculados previam esta contingência.

O problema de FPORS preventivo foi resolvido no solver de otimização *KNITRO* em interface com o GAMS. Os resultados são apresentados na Tabela 6, em que se mostram também os valores obtidos das tensões após a contingência.

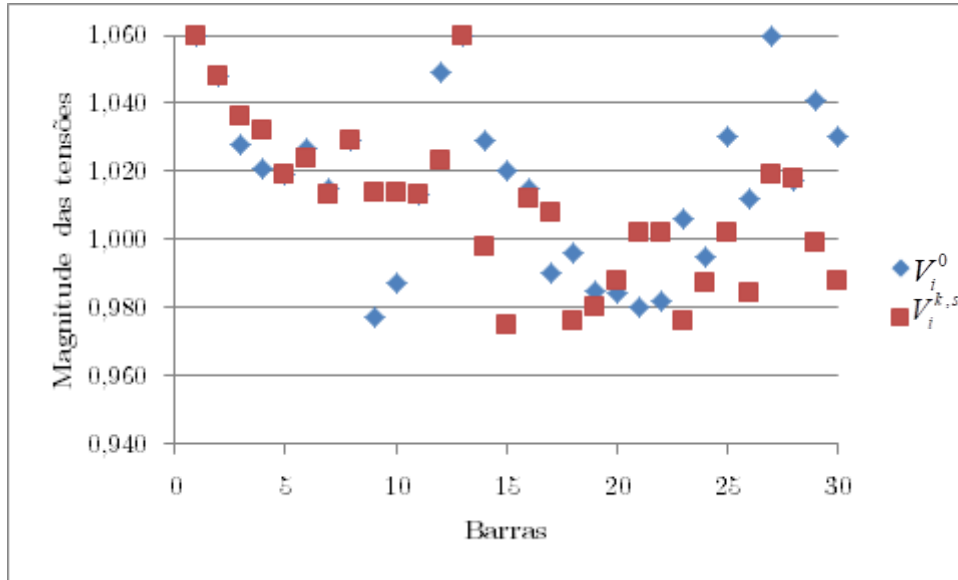
Tabela 6 – Estado ótimo para o caso preventivo 30 barras

Barra	V_i^0	$V_i^{1,s}$	P_i^G
1	1,060	1,060	1,386
2	1,048	1,048	0,450
3	1,028	1,036	-
4	1,021	1,032	-
5	1,019	1,019	0,265
6	1,027	1,024	-
7	1,015	1,013	-
8	1,029	1,029	0,350
9	0,977	1,014	-
10	0,987	1,014	-
11	1,013	1,013	0,242
12	1,049	1,023	-
13	1,060	1,060	0,217
14	1,029	0,998	-
15	1,020	0,975	-
16	1,015	1,012	-
17	0,990	1,008	-
18	0,996	0,976	-
19	0,985	0,980	-
20	0,984	0,988	-
21	0,980	1,002	-
22	0,982	1,002	-
23	1,006	0,976	-
24	0,995	0,987	-
25	1,030	1,002	-
26	1,012	0,984	-

27	1,060	1,019	-
28	1,017	1,018	-
29	1,041	0,999	-
30	1,030	0,988	-

A Figura 9 apresenta a magnitude das tensões dentro dos limites.

Figura 9 - Magnitude das tensões 30 barras caso preventivo



O valor da função objetivo obtido é de \$719,49, o método convergiu em um tempo de computação de 0,5s.

Na Tabela 7 estão os resultados para os *taps* dos transformadores.

Tabela 7 – Valores obtidos para o *tap* caso preventivo 30 barras

Ramo	tap_{im}^0
6-9	0,900
6-10	0,900
4-12	1,100
28-27	1,100

4.1.3 30 barras corretivo

Para o caso corretivo também foi considerada uma contingência no ramo 12-15, ou seja, o ramo de transmissão que conecta a barra 12 à barra 15.

Nesse caso os limites dos fluxos nos ramos de transmissão (L_m) são considerados maiores do que o caso base conforme Anexo, os limites inferior e

superior das magnitudes tensões neste sistema também são aumentados, tendo as novas tensões canalizadas da seguinte maneira $0,85 \leq V_i^{k,s} \leq 1,15$ e $0,90 \leq V_i^k \leq 1,10$. A formulação do caso corretivo é dada pelas restrições (3.54)-(3.82), ou seja, além das restrições com caso base e do caso preventivo, são acrescentadas as equações de balanço de potência ativa e reativa, de fluxo de potência nos ramos de transmissão e os limites operacionais de médio prazo para o sistema com uma contingência. As restrições (3.79)-(3.81) garantem que os ajustes entre o caso base e pós-contingência seja realista, conforme:

$$|Pg_g^0 - Pg_g^k| \leq 0,40 \quad \forall g \in G$$

$$|V_i^0 - V_i^k| \leq 0,10 \quad \forall i \in NB$$

$$|tap_{im}^0 - tap_{im}^k| \leq 0,15 \quad \forall im \in RAT^k$$

Neste caso, as variáveis $u^k = (P_g^{G,k}, V_g^k), \forall g \in G$ são denominadas de controles corretivos, pois quando ocorrer a contingência o operador já tem as ações corretivas que devem ser implementadas no sistema, para que o sistema continue operando de modo factível.

O problema de FPORSMCZOP corretivo também foi resolvido pelo pacote de otimização *KNITRO*. Os resultados são apresentados na Tabela 8.

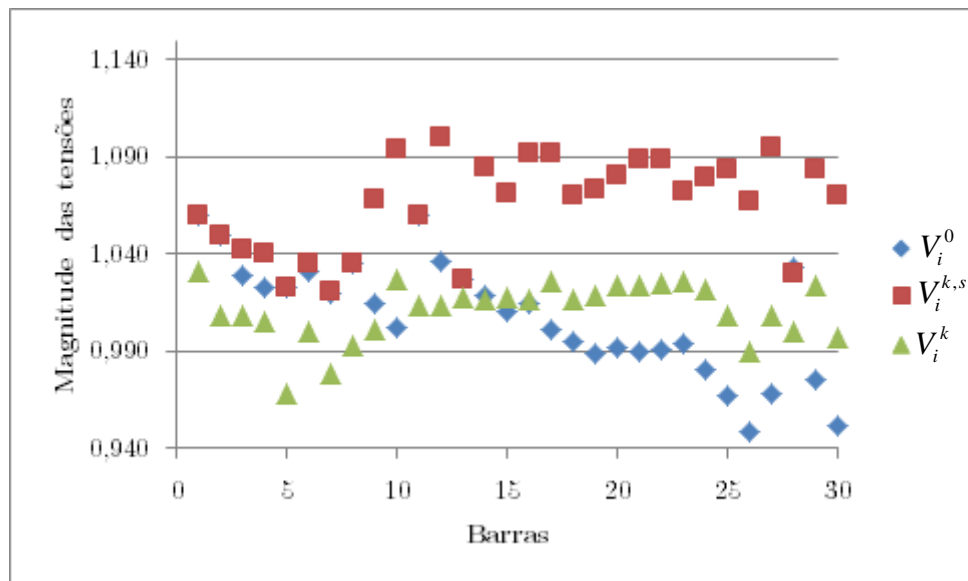
Tabela 8 – Estado para o caso corretivo 30 barras

Barra	V_i^0	$V_i^{1,s}$	V_i^1	$P_i^{G,0}$	$P_i^{G,1}$
1	1,060	1,060	1,031	1,382	1,745
2	1,049	1,049	1,008	0,450	0,550
3	1,029	1,042	1,008	-	-
4	1,023	1,040	1,005	-	-
5	1,023	1,023	0,968	0,264	0,218
6	1,031	1,035	1	-	-
7	1,020	1,021	0,978	-	-
8	1,035	1,035	0,993	0,350	0,219
9	1,014	1,068	1,001	-	-
10	1,002	1,094	1,027	-	-
11	1,060	1,060	1,013	0,239	0,110

12	1,036	1,100	1,013	-	-
13	1,027	1,027	1,017	0,220	0,109
14	1,018	1,085	1,016	-	-
15	1,010	1,071	1,017	-	-
16	1,014	1,092	1,016	-	-
17	1,001	1,092	1,026	-	-
18	0,995	1,070	1,016	-	-
19	0,989	1,073	1,018	-	-
20	0,992	1,080	1,024	-	-
21	0,990	1,089	1,024	-	-
22	0,991	1,089	1,025	-	-
23	0,994	1,072	1,026	-	-
24	0,980	1,079	1,022	-	-
25	0,967	1,084	1,008	-	-
26	0,948	1,067	0,99	-	-
27	0,968	1,095	1,008	-	-
28	1,033	1,030	1	-	-
29	0,975	1,084	1,024	-	-
30	0,951	1,070	0,997	-	-

A Figura 10 apresenta a magnitude das tensões dentro dos limites.

Figura 10 - Magnitude das tensões 30 barras caso corretivo



O valor da função objetivo obtido é de \$717,59, o método convergiu em um tempo de computação de 2,75s.

Na Tabela 9 estão os resultados para os *taps* dos transformadores nos ramos.

Tabela 9 – Valores obtidos dos *taps* caso corretivo 30 barras

Ramo	tap_{im}^0	tap_{im}^1
6-9	0,963	0,943
6-10	0,901	0,956
4-12	1,100	0,95
28-27	0,916	0,963

O sistema IEEE de 30 barras foi utilizado para a obtenção dos resultados. Neste sistema é possível verificar o impacto que a “segurança” causa no custo de operação de um sistema elétrico, neste caso considerando apenas um ramo.

O primeiro modelo resolvido foi o FPORS caso base, sem as restrições de segurança, resultando em um custo total de \$ 714,60. Já o caso preventivo o custo total aumentou para \$719,49, pois o operador não precisa tomar nenhuma decisão já que os controles calculados já previam a interrupção do ramo 12-15. Por fim o caso corretivo (FPORSMCZOP) com um custo total de \$717,59, neste caso o operador deve tomar decisões de correção, já calculadas, caso ocorra à interrupção do ramo 12-15.

4.2 Sistema IEEE 57 barras

4.2.1 Caso base

Os dados do sistema elétrico IEEE 57 barras, foram obtidos em <https://matpower.org/#docs> (acessado em 08/07/2019). Este sistema elétrico possui:

- 57 barras;
- 80 ramos de transmissão;
- 7 geradores;
- 17 transformadores com controle de *taps*;

O problema de FPO caso base, envolve somente as restrições (3.54)-(3.65), considera ponto de carregamento de válvula, múltiplos combustíveis e zonas de operação proibida.

Os coeficientes da função objetivo (3.53), que representam os custos de geração de cada gerador, são fornecidos na Tabela 10, os dados foram obtidos em Chiab *et al.* 2016. Os custos para o combustível 2 foram considerados 10% acima primeiro combustível.

Tabela 10 - Coeficientes de custo do sistema elétrico de 57 barras

Barra	a	b	c	e	f	$P_{i,m}^{\min}$	$P_{i,m}^{\max}$
1	0,00375	2	0	18	0,037	0	1,4
	0,004125	2,2	0	19,8	0,0407	1,4	5,7588
2	0,0175	1,75	0	16	0,038	0	0,55
	0,01925	1,925	0	17,6	0,0418	0,55	1
3	0,025	3	0	13,5	0,041	0	1,4
6	0,0375	2	0	18	0,037	0	1
8	0,0625	1	0	14	0,04	0	5,5
9	0,0195	1,75	0	15	0,039	0	1
12	0,00834	3,25	0	12	0,045	0	4,1

Fonte: Chiab (2016)

Na Tabela 11 são apresentadas as zonas de operação proibida do sistema elétrico de 57 barras.

Tabela 11 - Zonas de operação proibida do sistema de 57 barras

Barra	P_i^{G,\min_1}	P_i^{G,\max_1}	P_i^{G,\min_2}	P_i^{G,\max_2}
1	0,55	0,66	1,8	2,6
2	0,21	0,24	-	-
3	0,45	0,55	-	-
6	0,3	0,36	-	-
8	1	2	-	-
9	0,75	1	-	-
12	0,24	1,8	-	-

Neste teste, as magnitudes das tensões são canalizadas na região $0,94 \leq V_i^0 \leq 1,06$, em todas as barras, os *taps* dos transformadores também são canalizados por $0,9 \leq tap_{km}^0 \leq 1,1 pu$.

O resultado obtido a partir da resolução do problema de FPORS proposto caso base pelo solver de otimização *KNITRO*, é apresentado na Tabela 12.

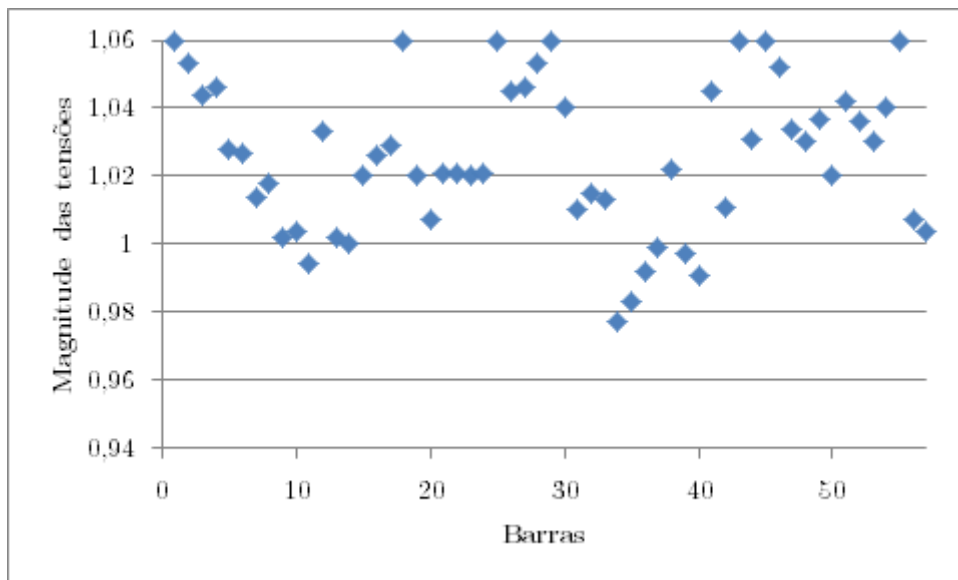
Tabela 12 - Estado ótimo obtido para o caso base 57 barras

Barras	V_i^0	$P_i^{G,0}$
1	1,06	5,759
2	1,053	1
3	1,044	0,796
4	1,046	-
5	1,028	-
6	1,027	1
7	1,014	-
8	1,018	0,622
9	1,002	1
10	1,004	-
11	0,994	-
12	1,033	2,793
13	1,002	-
14	1	-
15	1,02	-
16	1,026	-
17	1,029	-
18	1,06	-
19	1,02	-
20	1,007	-
21	1,021	-
22	1,021	-
23	1,02	-
24	1,021	-
25	1,06	-
26	1,045	-
27	1,046	-
28	1,053	-
29	1,06	-
30	1,04	-
31	1,01	-
32	1,015	-
33	1,013	-
34	0,977	-
35	0,983	-
36	0,992	-
37	0,999	-
38	1,022	-

39	0,997	-
40	0,991	-
41	1,045	-
42	1,011	-
43	1,06	-
44	1,031	-
45	1,06	-
46	1,052	-
47	1,034	-
48	1,03	-
49	1,037	-
50	1,02	-
51	1,042	-
52	1,036	-
53	1,03	-
54	1,04	-
55	1,06	-
56	1,007	-
57	1,004	-

A Figura 11 apresenta a magnitude das tensões dentro dos limites.

Figura 11 - Magnitude das tensões 57 barras caso base



O valor da função objetivo obtido calculado é de \$ 5663,22, o algoritmo convergiu em um tempo de computação de 2,1s.

Na Tabela 13 estão os valores calculados para os *taps* dos transformadores.

Tabela 13 - Valores obtidos para os taps caso base 57 barras

Ramo	tap_{im}^0
4-18	0,906
4-18	0,9
21-20	0,984
24-25	0,982
24-25	0,982
24-26	1,024
7-29	1,051
34-32	1,056
11-41	1,1
15-45	1,041
14-46	1,061
10-51	1,045
13-49	1,089
11-43	1,074
40-56	1,012
39-57	1,043
9-55	1,061

4.2.2 57 barras preventivo

Para o caso preventivo foi considerada uma contingência no ramo 10-51, ou seja, o ramo de transmissão que conecta a barra 10 a barra 51.

Nesse caso os limites dos fluxos nos ramos de transmissão (L_s) são considerados maiores do que o caso base e são apresentados no Anexo e $0,9 \leq V_i^{k,s} \leq 1,1$. Na formulação do caso preventivo consideram-se apenas as restrições (3.54)-(3.69), ou seja, além das restrições do caso base, são acrescentadas as restrições de balanço de potência ativa e reativa, de fluxo de potência nos ramos de transmissão e os limites operacionais de curto prazo para o sistema com uma contingência.

O problema de FPORS preventivo foi resolvido pelo solver de otimização *KNITRO* em interface com o GAMS. Os resultados são apresentados na Tabela 14, em que também apresenta os valores obtidos das tensões após a contingência.

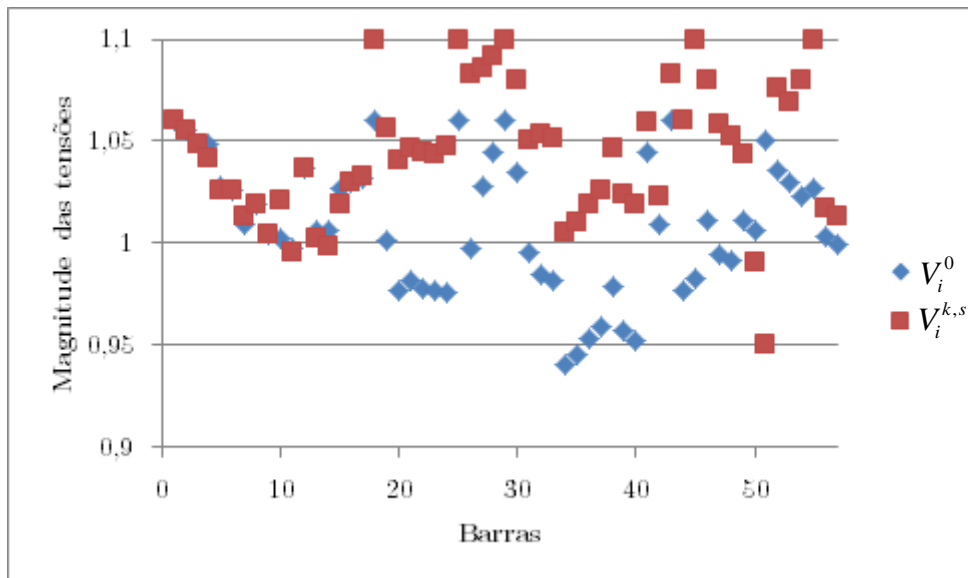
Tabela 14 - Estado ótimo para o caso preventivo 57 barras

Barras	V_i^0	$V_i^{1,s}$	P_i^G
1	1,06	1,06	5,331
2	1,055	1,055	1
3	1,048	1,048	0,912
4	1,048	1,042	-
5	1,028	1,026	-
6	1,026	1,026	1
7	1,009	1,013	-
8	1,019	1,019	0,602
9	1,004	1,004	1
10	1,002	1,021	-
11	0,997	0,995	-
12	1,037	1,037	3,096
13	1,006	1,002	-
14	1,006	0,998	-
15	1,027	1,019	-
16	1,03	1,03	-
17	1,032	1,033	-
18	1,06	1,1	-
19	1,001	1,056	-
20	0,977	1,041	-
21	0,982	1,046	-
22	0,978	1,045	-
23	0,977	1,044	-
24	0,976	1,047	-
25	1,06	1,1	-
26	0,997	1,083	-
27	1,028	1,086	-
28	1,045	1,092	-
29	1,06	1,1	-
30	1,035	1,08	-
31	0,995	1,05	-
32	0,985	1,053	-
33	0,982	1,051	-
34	0,94	1,005	-
35	0,945	1,01	-

36	0,953	1,019	-
37	0,959	1,026	-
38	0,979	1,046	-
39	0,957	1,024	-
40	0,952	1,019	-
41	1,045	1,059	-
42	1,009	1,023	-
43	1,06	1,083	-
44	0,977	1,06	-
45	0,983	1,1	-
46	1,011	1,08	-
47	0,994	1,058	-
48	0,991	1,052	-
49	1,011	1,044	-
50	1,006	0,99	-
51	1,05	0,95	-
52	1,036	1,076	-
53	1,03	1,069	-
54	1,023	1,08	-
55	1,027	1,1	-
56	1,003	1,017	-
57	0,999	1,013	-

A Figura 12 apresenta a magnitude das tensões dentro dos limites.

Figura 12 - Magnitude das tensões 57 barras caso preventivo



O valor da função objetivo obtido calculado é de \$ 5913,37, o método convergiu em um tempo de computação de 1,5s.

Na Tabela 15 estão os valores calculados para os *taps* dos transformadores.

Tabela 15 - Valores obtidos para os *taps* caso preventivo 57 barras

Ramo	tap_{im}^0
4-18	0,9
4-18	0,908
21-20	0,976
24-25	1,1
24-25	1,1
24-26	1,016
7-29	1,061
34-32	1,052
11-41	1,1
15-45	0,943
14-46	1,014
10-51	1,061
13-49	1,074
11-43	1,071
40-56	1,041
39-57	1,083
9-55	1,019

4.2.3 57 barras corretivo

Para o caso corretivo também foi considerada uma contingência no ramo 10-51, ou seja, o ramo de transmissão que conecta a barra 10 à barra 51.

Nesse caso os limites dos fluxos nos ramos de transmissão (L_m) são considerados maiores do que no caso base, conforme Anexo, os intervalos entre os limites inferior e superior das magnitudes tensões neste sistema também são aumentados, tendo as novas tensões canalizadas da seguinte maneira $0,85 \leq V_i^{k,s} \leq 1,15$ e $0,90 \leq V_i^k \leq 1,10$. A formulação do caso corretivo é dada pelas restrições (3.54)-(3.82), ou seja, além das restrições com caso base e do caso preventivo, são acrescentadas as equações de balanço de potência ativa e reativa, de fluxo de potência nos ramos de transmissão e os limites operacionais de médio

prazo para o sistema com uma contingência. As restrições (3.79)-(3.81) garantem que os ajustes entre o caso base e pós-contingência seja realista, conforme:

$$|Pg_g^0 - Pg_g^k| \leq 0,40 \quad \forall g \in G$$

$$|V_i^0 - V_i^k| \leq 0,10 \quad \forall i \in NB$$

$$|tap_{im}^0 - tap_{im}^k| \leq 0,15 \quad \forall im \in RAT^k$$

Neste caso, as variáveis $u^k = (P_g^{G,k}, V_g^k), \forall g \in G$ são denominadas de controles corretivos, pois quando ocorrer a contingência o operador já tem as ações corretivas que devem ser implementadas no sistema, para que o sistema continue operando de modo factível.

O problema de FPORSMCZOP corretivo também foi resolvido pelo solver de otimização *KNITRO*. Os resultados são apresentados na Tabela 16.

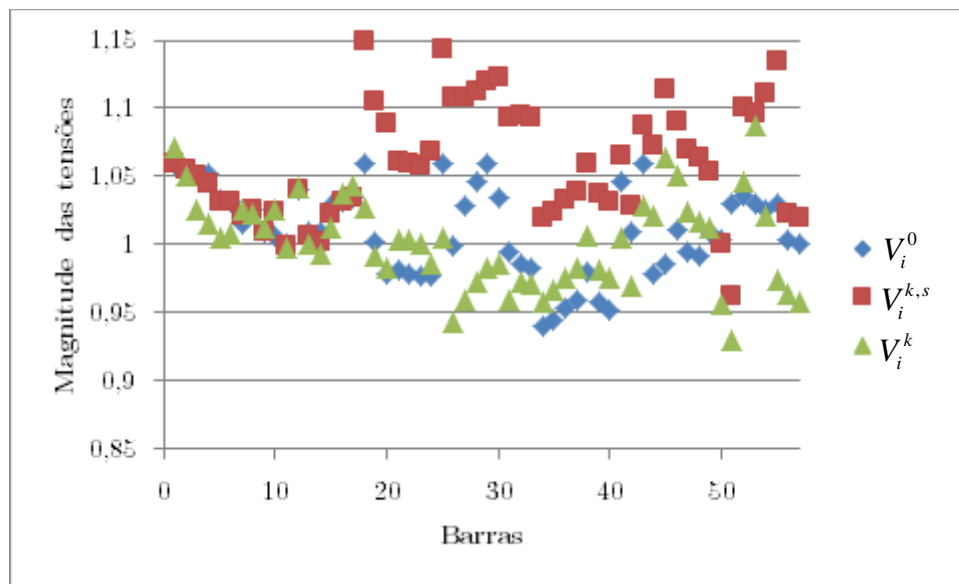
Tabela 16 - Estado para o caso corretivo 57 barras

Barras	V_i^0	$V_i^{1,s}$	V_i^1	$P_i^{G,0}$	$P_i^{G,1}$
1	1,06	1,06	1,071	5,328	5,2
2	1,055	1,055	1,051	1	0,764
3	1,051	1,051	1,025	0,913	1,2
4	1,052	1,045	1,015	-	-
5	1,033	1,031	1,005	-	-
6	1,031	1,031	1,008	1	0,275
7	1,015	1,021	1,025	-	-
8	1,025	1,025	1,022	0,602	0,873
9	1,009	1,009	1,012	1	1
10	1,006	1,024	1,026	-	-
11	1,001	0,999	0,998	-	-
12	1,04	1,04	1,042	3,097	3,74
13	1,009	1,006	1,001	-	-
14	1,009	1,002	0,993	-	-
15	1,029	1,022	1,012	-	-
16	1,032	1,032	1,038	-	-
17	1,034	1,034	1,043	-	-
18	1,06	1,15	1,027	-	-
19	1,002	1,105	0,992	-	-
20	0,978	1,089	0,983	-	-
21	0,982	1,061	1,003	-	-

22	0,978	1,059	1,003	-	-
23	0,977	1,058	1,001	-	-
24	0,977	1,068	0,985	-	-
25	1,06	1,143	1,005	-	-
26	0,999	1,108	0,943	-	-
27	1,028	1,108	0,959	-	-
28	1,046	1,113	0,972	-	-
29	1,06	1,12	0,983	-	-
30	1,035	1,123	0,985	-	-
31	0,995	1,093	0,959	-	-
32	0,986	1,095	0,973	-	-
33	0,983	1,093	0,971	-	-
34	0,94	1,019	0,958	-	-
35	0,945	1,024	0,966	-	-
36	0,953	1,033	0,976	-	-
37	0,959	1,039	0,983	-	-
38	0,98	1,059	1,007	-	-
39	0,957	1,037	0,982	-	-
40	0,952	1,032	0,975	-	-
41	1,046	1,065	1,005	-	-
42	1,01	1,029	0,969	-	-
43	1,06	1,088	1,029	-	-
44	0,978	1,073	1,021	-	-
45	0,986	1,114	1,064	-	-
46	1,011	1,091	1,05	-	-
47	0,994	1,069	1,024	-	-
48	0,991	1,064	1,017	-	-
49	1,01	1,054	1,012	-	-
50	1,004	1	0,956	-	-
51	1,03	0,962	0,93	-	-
52	1,036	1,101	1,046	-	-
53	1,03	1,096	1,088	-	-
54	1,025	1,111	1,021	-	-
55	1,03	1,135	0,974	-	-
56	1,004	1,023	0,963	-	-
57	1,001	1,019	0,958	-	-

A Figura 13 apresenta a magnitude das tensões dentro dos limites.

Figura 13 - Magnitude das tensões 57 barras caso corretivo



O valor da função objetivo obtido calculado é de \$ 5912,44, o programa computacional convergiu em um tempo de computação de 15,8s.

Na Tabela 17 estão os valores calculados para os *taps* dos transformadores.

Tabela 17 - Valores obtidos dos taps caso corretivo 57 barras

Ramo	tap_{im}^0	tap_{im}^1
4-18	0,9	1,016
4-18	0,9	1,01
21-20	0,977	0,983
24-25	1,096	1,038
24-25	1,096	1,037
24-26	1,018	0,953
7-29	1,054	0,939
34-32	1,054	1,045
11-41	1,1	1,044
15-45	0,946	1,061
14-46	1,011	1,074
10-51	1,054	-
13-49	1,068	1,081
11-43	1,066	1,042
40-56	1,043	0,993
39-57	1,084	1,006
9-55	1,017	0,927

O primeiro modelo resolvido foi o FPORS de 57 barras caso base, sem as restrições de segurança, resultando em um custo total de \$ 5663,22. No caso

preventivo o custo total aumentou para \$ 5913,37, pois o operador não precisa tomar nenhuma decisão já que os controles calculados já previam a interrupção do ramo 10-51. Por fim o caso corretivo (FPORSMCZOP) com um custo total de \$ 5912,44, neste caso o operador deve tomar decisões de correção, já calculadas, caso ocorra a interrupção do ramo 10-51.

4.3 Sistema IEEE 118 barras

4.3.1 Caso base

Os dados do sistema elétrico IEEE 118 barras, foram obtidos em <https://matpower.org/#docs> (acessado em 08/07/2019). Este sistema elétrico possui:

- 118 barras;
- 186 ramos de transmissão;
- 54 geradores;
- 9 transformadores com controle de *taps*;

O problema de FPO caso base, é formulado considerando as restrições (3.54)-(3.65), ponto de carregamento de válvula, múltiplos combustíveis e zonas de operação proibida.

Os coeficientes da função objetivo (3.53), que representam os custos de geração de cada gerador, foram obtidos em Pinheiro *et al.* (2019). Os custos para os combustíveis 2 e 3 foram considerados 10% e 15% acima do primeiro combustível, respectivamente, como sugerido em Pourakbari *et al.* (2019). Na Tabela 18 são apresentados os coeficientes de custo do sistema de 118 barras.

Tabela 18 - Coeficientes de custo do sistema elétrico de 118 barras

Barras	a	b	c	e	f	$P_i^{G.min}$	$P_i^{G.max}$
1	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
4	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
6	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
8	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
10	0,022222	20	0	443,0554	0,022848	0	5,5
12	0,117947	20	0	193,4184	0,067926	0	1,85
15	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
18	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
19	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
24	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
25	0,045455	20	0	276,3635	0,03927	0	3,2
26	0,031847	20	0	343,4616	0,030354	0	4,14

27	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
31	1,428571	20	0	462,3928	0,117443	0	1,07
32	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
34	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
36	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
40	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
42	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
46	0,526316	20	0	245,8289	0,1056	0	1,19
49	0,04902	20	0	265,2549	0,041337	0	3,04
54	0,208333	20	0	188,0833	0,084908	0	1,48
55	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
56	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
59	0,064516	20	0	232,379	0,04928	0	2,55
61	0,0625	20	0	235,625	0,048332	0	2,6
62	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
65	0,025575	20	0	399,6436	0,025593	0	4,91
66	0,02551	20	0	400,3775	0,025541	0	4,92
69	0,019365	20	0	716,4778	0,015607	0	8,052
70	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
72	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
73	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
74	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
76	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
77	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
80	0,020964	20	0	462,9906	0,021779	0	5,77
85	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
87	2,5	20	0	728	0,12083	0	1,04
89	0,016474	20	0	559,3678	0,017774	0	7,07
90	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
91	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
92	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
99	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
100	0,039683	20	0	298,9205	0,0357	0	3,52
103	0,25	20	0	192,5	0,08976	0	1,4
104	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
105	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
107	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
110	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
111	0,277778	20	0	196,4444	0,0924	0	1,36
112	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
113	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1
116	0,01	40	0	102,5	0,125664	0	1

Fonte: Pinheiro (2019)

Na Tabela 19 são apresentadas as zonas de operação proibidas para o sistema elétrico de 118 barras.

Tabela 19 - Zonas de operação proibida do sistema de 118 barras

Barras	P_i^{G,\min_1}	P_i^{G,\max_1}	P_i^{G,\min_2}	P_i^{G,\max_2}	P_i^{G,\min_3}	P_i^{G,\max_3}
1,4,6,15,34,70	0,20	0,30	0,60	0,85	-	-
10	0,15	0,45	1,65	2,00	3,95	4,10
25	0,40	0,65	1,90	2,00	-	-
26	0,75	0,95	2,60	2,80	-	-
40,42,85,99,104,116	0,20	0,30	0,45	0,55	-	-
49	0,45	0,60	1,85	2,00	-	-
59	0,95	1,05	1,40	1,55	-	-
61	1,45	1,55	2,10	2,30	-	-
65	1,80	2,00	3,50	3,60	-	-
89	1,20	1,45	4,10	4,60	5,00	5,25

Fonte: Pourakbari (2019)

Na Tabela 20 são apresentadas as faixas dos combustíveis para o sistema elétrico de 118 barras.

Tabela 20 - Faixas dos combustíveis do sistema elétrico de 118 barras

Barras	Combustível	$P_{i,m}^{G,\min}$	$P_{i,m}^{G,\max}$
1,4,6,15,34,70	1	0	0,50
	2	0,50	1,00
10	1	0	1,75
	2	1,75	5,50
49	1	0	2,10
	2	2,10	3,04
89	1	0	1,50
	2	1,50	4,45
	3	4,45	7,07

Fonte: Pourakbari (2019)

Neste problema, as magnitudes das tensões são canalizadas na região $0,94 \leq V_i^0 \leq 1,06$, em todas as barras, os *taps* dos transformadores também são canalizados por $0,95 \leq tap_{km}^0 \leq 1,05$.

Os resultados obtidos a partir da resolução do problema de FPORS caso base pelo solver de otimização *KNITRO* são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Estado ótimo obtido para o caso base 118 barras

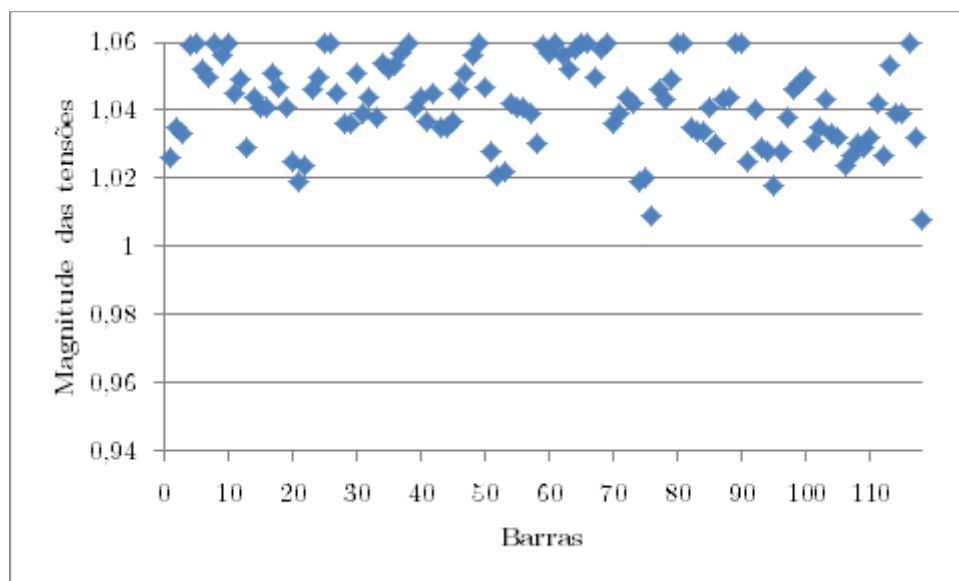
Barras	V_i^0	$P_i^{G,0}$
1	1,026	0,066
2	1,035	-
3	1,033	-
4	1,059	0
5	1,06	-
6	1,052	0
7	1,05	-
8	1,06	0,107
9	1,056	-
10	1,06	3,142
11	1,045	-
12	1,049	0,953
13	1,029	-
14	1,044	-
15	1,041	0,3
16	1,041	-
17	1,051	-
18	1,047	0,216
19	1,041	0,249
20	1,025	-
21	1,019	-
22	1,024	-
23	1,046	-
24	1,05	0
25	1,06	2
26	1,06	2,853
27	1,045	0,189
28	1,036	-
29	1,036	-
30	1,051	-
31	1,039	0,073
32	1,044	0,242
33	1,038	-
34	1,054	0
35	1,052	-
36	1,053	0,163
37	1,057	-
38	1,06	-
39	1,041	-
40	1,044	0,55
41	1,037	-
42	1,045	0,401

43	1,035	-
44	1,035	-
45	1,037	-
46	1,046	0,19
47	1,051	-
48	1,056	-
49	1,06	2,1
50	1,047	-
51	1,028	-
52	1,021	-
53	1,022	-
54	1,042	0,494
55	1,041	0,3
56	1,041	0,303
57	1,039	-
58	1,03	-
59	1,059	1,55
60	1,057	-
61	1,06	1,45
62	1,056	0
63	1,052	-
64	1,058	-
65	1,06	3,5
66	1,06	3,491
67	1,05	-
68	1,058	-
69	1,06	4,533
70	1,036	0
71	1,039	-
72	1,044	0,068
73	1,042	0,17
74	1,019	0,33
75	1,02	-
76	1,009	0,326
77	1,046	0
78	1,043	-
79	1,049	-
80	1,06	4,366
81	1,06	-
82	1,035	-
83	1,034	-
84	1,034	-
85	1,041	0,896
86	1,03	-
87	1,043	0,044

88	1,044	-
89	1,06	3,142
90	1,06	0,009
91	1,025	0
92	1,04	0,311
93	1,029	-
94	1,028	-
95	1,018	-
96	1,028	-
97	1,038	-
98	1,046	-
99	1,048	0
100	1,05	2,341
101	1,031	-
102	1,035	-
103	1,043	0,386
104	1,033	0,007
105	1,032	0,103
106	1,024	-
107	1,027	0,32
108	1,03	-
109	1,029	-
110	1,032	0,099
111	1,042	0,353
112	1,027	0,382
113	1,053	0,04
114	1,039	-
115	1,039	-
116	1,06	0,04
117	1,032	-
118	1,008	-

A Figura 14 apresenta a magnitude das tensões dentro dos limites.

Figura 14 - Magnitude das tensões 118 barras caso base



O valor da função objetivo obtido calculado é de \$ 134067,11, o programa computacional convergiu em um tempo de processamento de 10,528s.

Na Tabela 22 estão os valores calculados para os *taps* dos transformadores.

Tabela 22 - Valores obtidos para os taps caso base 118 barras

Ramo	tap_{in}^0
8-5	1,017
26-25	0,951
30-17	1,002
38-37	0,981
63-59	1,013
64-61	0,993
65-66	1,017
68-69	1,034
81-80	0,997

4.3.2 118 barras preventivo

Para o caso preventivo foi considerada uma contingência no ramo que conecta as barras 49-54.

Nesse caso os limites dos fluxos nos ramos de transmissão (L_s) são considerados maiores do que o caso base e são apresentados no Anexo e $0,9 \leq V_i^{k,s} \leq 1,1$. A formulação do caso preventivo considera apenas as restrições (3.54)-(3.69), ou seja, além das restrições do caso base, são acrescentadas as restrições de balanço de potências ativa e reativa, de fluxo de potência nos ramos de transmissão e os limites operacionais de curto prazo para o sistema com uma contingência.

O problema de FPORS preventivo foi resolvido pelo solver de otimização *KNITRO* em interface com o GAMS. Os resultados são apresentados na Tabela 23, em que também mostram-se os valores obtidos para magnitudes das tensões após a contingência.

Tabela 23 - Estado ótimo para o caso preventivo 118 barras

Barras	V_i^0	$V_i^{1,s}$	$P_i^{G,0}$
1	1,014	1,014	0,065
2	1,019	1,019	-
3	1,023	1,021	-
4	1,05	1,05	0
5	1,06	1,05	-
6	1,038	1,038	0
7	1,035	1,035	-
8	1,053	1,053	1
9	1,056	1,056	-
10	1,06	1,06	1,65
11	1,03	1,028	-
12	1,031	1,031	1,225
13	1,003	1,002	-
14	1,014	1,014	-
15	0,978	0,978	0,3
16	1,007	1,006	-
17	0,984	0,982	-
18	0,977	0,977	0,657
19	0,973	0,973	0,269
20	0,958	0,958	-
21	0,953	0,953	-
22	0,959	0,959	-
23	0,984	0,984	-

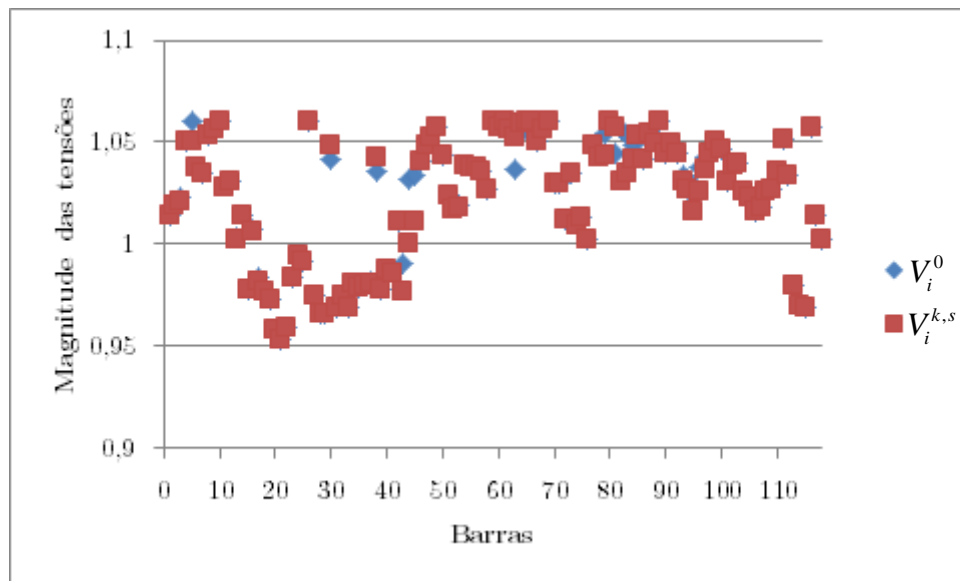
24	0,994	0,994	0,025
25	0,991	0,991	2,268
26	1,06	1,06	0,75
27	0,975	0,975	0,659
28	0,966	0,966	-
29	0,966	0,966	-
30	1,042	1,048	-
31	0,969	0,969	0,079
32	0,975	0,975	0,543
33	0,969	0,969	-
34	0,981	0,981	0
35	0,979	0,979	-
36	0,98	0,98	0,35
37	0,982	0,981	-
38	1,036	1,043	-
39	0,978	0,978	-
40	0,988	0,988	0,45
41	0,986	0,986	-
42	1,011	1,011	0,45
43	0,99	0,977	-
44	1,032	1	-
45	1,034	1,011	-
46	1,041	1,041	0,191
47	1,048	1,048	-
48	1,053	1,052	-
49	1,057	1,057	2,1
50	1,044	1,044	-
51	1,024	1,024	-
52	1,018	1,017	-
53	1,019	1,018	-
54	1,039	1,039	0,497
55	1,038	1,038	0,307
56	1,038	1,038	0,316
57	1,036	1,036	-
58	1,027	1,027	-
59	1,06	1,06	1,4
60	1,057	1,057	-
61	1,06	1,06	1,447
62	1,056	1,056	0
63	1,037	1,052	-
64	1,054	1,059	-
65	1,06	1,06	3,6
66	1,06	1,06	3,413
67	1,05	1,05	-
68	1,06	1,056	-

69	1,06	1,06	4,428
70	1,03	1,03	0,85
71	1,03	1,03	-
72	1,012	1,012	0
73	1,035	1,035	0
74	1,009	1,009	0,021
75	1,013	1,013	-
76	1,002	1,002	0,153
77	1,048	1,048	0
78	1,046	1,043	-
79	1,054	1,044	-
80	1,06	1,06	4,181
81	1,045	1,057	-
82	1,056	1,031	-
83	1,053	1,035	-
84	1,048	1,042	-
85	1,053	1,053	0,55
86	1,042	1,042	-
87	1,054	1,054	0,04
88	1,049	1,049	-
89	1,06	1,06	3,142
90	1,045	1,045	0,388
91	1,049	1,049	0,175
92	1,045	1,045	0,112
93	1,034	1,031	-
94	1,032	1,027	-
95	1,024	1,016	-
96	1,038	1,026	-
97	1,043	1,037	-
98	1,045	1,045	-
99	1,05	1,05	0,55
100	1,046	1,046	1,624
101	1,031	1,031	-
102	1,039	1,039	-
103	1,04	1,04	0,281
104	1,026	1,026	0,55
105	1,023	1,023	0,293
106	1,016	1,016	-
107	1,018	1,018	0,287
108	1,026	1,026	-
109	1,027	1,027	-
110	1,036	1,036	0,042
111	1,051	1,051	0,351
112	1,034	1,034	0,352
113	0,98	0,98	0,102

114	0,97	0,97	-
115	0,969	0,969	-
116	1,057	1,057	0,55
117	1,014	1,014	-
118	1,002	1,002	-

A Figura 15 apresenta a magnitude das tensões dentro dos limites.

Figura 15 - Magnitude das tensões 118 barras caso preventivo



O valor da função objetivo obtido calculado é de \$ 139476,68, a implementação computacional do algoritmo convergiu em um tempo de processamento de 9446,7s.

Na Tabela 24 estão os valores calculados para os *taps* dos transformadores.

Tabela 24 - Valores obtidos para os *taps* caso preventivo 118 barras

Ramo	tap_{im}^0
4-18	0,9
4-18	0,908
21-20	0,976
24-25	1,1
24-25	1,1
24-26	1,016
7-29	1,061
34-32	1,052
11-41	1,1
15-45	0,943
14-46	1,014

10-51	1,061
13-49	1,074
11-43	1,071
40-56	1,041
39-57	1,083
9-55	1,019

4.3.3 118 barras corretivo

Para o caso de controle corretivo também foi considerada uma contingência no ramo de transmissão entre as barras 49-54.

Nesse caso os limites dos fluxos nos ramos de transmissão (L_m) são considerados maiores do que o caso base conforme apresentadas no Anexo, os limites inferior e superior das magnitudes tensões neste sistema também são aumentados, tendo as novas magnitudes das tensões canalizadas da seguinte maneira $0,85 \leq V_i^{k,s} \leq 1,15$, $0,90 \leq V_i^k \leq 1,10$ e $0,9 \leq tap_{im}^k \leq 1,1$. A formulação do caso corretivo é dada pelas restrições (3.54)-(3.82), ou seja, além das restrições com caso base e do caso preventivo, são acrescentadas as equações de balanço de potência ativa e reativa, de fluxo de potência nos ramos de transmissão e os limites operacionais de médio prazo para o sistema com uma contingência. As restrições (3.79)-(3.81) garantem que os ajustes entre o caso base e pós-contingência seja realista, conforme:

$$|Pg_g^0 - Pg_g^k| \leq 0,40 \quad \forall g \in G$$

$$|V_i^0 - V_i^k| \leq 0,10 \quad \forall i \in NB$$

$$|tap_{im}^0 - tap_{im}^k| \leq 0,15 \quad \forall im \in RAT^k$$

Neste caso, as variáveis $u^k = (P_g^{G,k}, V_g^k), \forall g \in G$ são denominadas de controles corretivos, pois quando ocorrer a contingência o operador já tem as ações corretivas que devem ser implementadas no sistema, para que o sistema continue operando de modo factível.

O problema de FPORSMCZOP corretivo também foi resolvido pelo solver de otimização *KNITRO*. Os resultados são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Estado ótimo para o caso corretivo 118 barras

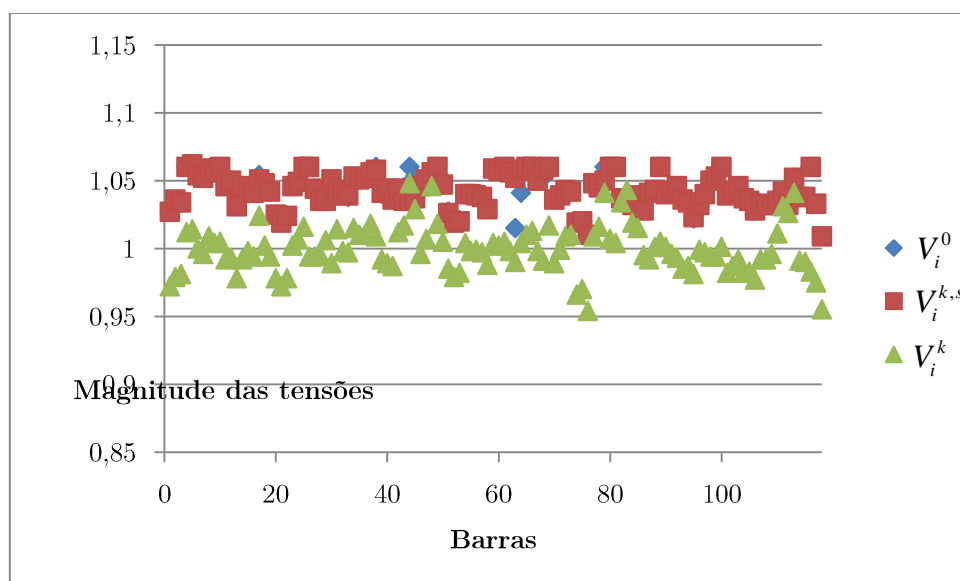
Barra	V_i^0	$V_i^{1,s}$	V_i^1	$P_i^{G,0}$	$P_i^{G,1}$
1	1,027	1,027	0,972	0,065	0,356
2	1,036	1,036	0,979	-	-
3	1,034	1,034	0,981	-	-
4	1,06	1,06	1,012	0	0,327
5	1,06	1,062	1,014	-	-
6	1,054	1,054	1	0	0,318
7	1,052	1,052	0,996	-	-
8	1,059	1,059	1,009	0,115	0,052
9	1,056	1,056	1,004	-	-
10	1,06	1,06	1,005	3,142	2,792
11	1,046	1,046	0,992	-	-
12	1,05	1,05	0,993	0,955	0,778
13	1,031	1,031	0,978	-	-
14	1,046	1,046	0,992	-	-
15	1,042	1,042	0,998	0,3	0,362
16	1,042	1,041	0,994	-	-
17	1,054	1,051	1,024	-	-
18	1,048	1,048	1,002	0,208	0,128
19	1,042	1,042	0,994	0,236	0,204
20	1,025	1,025	0,978	-	-
21	1,019	1,019	0,972	-	-
22	1,024	1,024	0,978	-	-
23	1,046	1,046	1,002	-	-
24	1,049	1,049	1,007	0	0,097
25	1,06	1,06	1,016	2	1,668
26	1,06	1,06	0,994	2,853	2,862
27	1,044	1,044	0,994	0,187	0,093
28	1,035	1,035	0,995	-	-
29	1,035	1,035	1,006	-	-
30	1,046	1,051	0,989	-	-
31	1,039	1,039	1,014	0,073	0,12
32	1,043	1,043	0,998	0,241	0,116
33	1,038	1,039	0,997	-	-
34	1,053	1,053	1,015	0	0,333
35	1,051	1,051	1,01	-	-
36	1,052	1,052	1,01	0,141	0,097
37	1,055	1,056	1,018	-	-
38	1,06	1,058	1,009	-	-

39	1,04	1,041	0,992	-	-
40	1,044	1,044	0,989	0,55	0,653
41	1,036	1,036	0,987	-	-
42	1,044	1,044	1,012	0,36	0,119
43	1,045	1,035	1,017	-	-
44	1,06	1,035	1,048	-	-
45	1,053	1,037	1,029	-	-
46	1,046	1,046	0,996	0,188	0,157
47	1,051	1,051	1,007	-	-
48	1,056	1,056	1,046	-	-
49	1,06	1,06	1,018	2,1	2,07
50	1,047	1,047	1,005	-	-
51	1,027	1,026	0,985	-	-
52	1,02	1,019	0,979	-	-
53	1,021	1,02	0,982	-	-
54	1,04	1,04	1,004	0,497	0,661
55	1,04	1,04	0,998	0,337	0,374
56	1,039	1,039	0,999	0,345	0,308
57	1,038	1,038	0,997	-	-
58	1,029	1,029	0,988	-	-
59	1,059	1,059	1,004	1,55	1,271
60	1,057	1,057	1,002	-	-
61	1,06	1,06	1,005	1,45	1,611
62	1,056	1,056	0,998	0	0,091
63	1,015	1,052	0,99	-	-
64	1,041	1,058	1,004	-	-
65	1,06	1,06	1,01	3,5	3,653
66	1,06	1,06	1,013	3,469	3,138
67	1,051	1,05	0,998	-	-
68	1,052	1,058	0,991	-	-
69	1,06	1,06	1,017	4,481	4,174
70	1,036	1,036	0,989	0	0,08
71	1,039	1,039	0,999	-	-
72	1,043	1,043	1,009	0,07	0,116
73	1,042	1,042	1,01	0,179	0,106
74	1,019	1,019	0,966	0,317	0,276
75	1,02	1,02	0,97	-	-
76	1,01	1,01	0,954	0,303	0,287
77	1,048	1,048	1,009	0	0,121
78	1,049	1,045	1,016	-	-
79	1,06	1,05	1,041	-	-
80	1,06	1,06	1,007	4,274	3,971
81	1,06	1,06	1,004	-	-
82	1,036	1,037	1,034	-	-
83	1,034	1,035	1,043	-	-

84	1,032	1,032	1,019	-	-
85	1,039	1,039	1,015	1	0,755
86	1,028	1,028	0,995	-	-
87	1,041	1,041	0,992	0,048	0,077
88	1,043	1,043	1,001	-	-
89	1,06	1,06	1,005	3,478	3,275
90	1,04	1,04	1,001	0	0,262
91	1,042	1,042	0,996	0	0,08
92	1,046	1,046	0,993	0	0,152
93	1,035	1,036	0,985	-	-
94	1,034	1,034	0,987	-	-
95	1,022	1,023	0,981	-	-
96	1,031	1,032	0,999	-	-
97	1,04	1,04	0,997	-	-
98	1,05	1,05	0,994	-	-
99	1,053	1,053	0,994	0	0,048
100	1,06	1,06	1,001	3,079	2,724
101	1,039	1,039	0,982	-	-
102	1,042	1,042	0,987	-	-
103	1,046	1,046	0,992	0,288	0,074
104	1,037	1,037	0,982	0	0,319
105	1,035	1,035	0,983	0	0,112
106	1,028	1,028	0,977	-	-
107	1,033	1,033	0,992	0,025	0,198
108	1,032	1,032	0,992	-	-
109	1,032	1,032	0,996	-	-
110	1,035	1,035	1,011	0	0,153
111	1,042	1,042	1,031	0,248	0,2
112	1,032	1,032	1,026	0,489	0,435
113	1,052	1,052	1,041	0	0,075
114	1,038	1,038	0,991	-	-
115	1,038	1,038	0,99	-	-
116	1,06	1,06	0,983	0	0,333
117	1,033	1,033	0,975	-	-
118	1,009	1,009	0,955	-	-

A Figura 16 apresenta a magnitude das tensões dentro dos limites.

Figura 16 - Magnitude das tensões 118 barras caso corretivo



O valor da função objetivo obtido calculado é de \$ 136261,98, o algoritmo convergiu em um tempo de processamento de 6633,2s.

Na Tabela 26 estão os valores calculados para os *taps* dos transformadores.

Tabela 26 - Valores obtidos dos taps caso corretivo 118 barras

Ramo	tap_{im}^0	tap_{im}^1
8-5	1,013	0,977
26-25	1,015	1,007
30-17	1,018	1,051
38-37	0,975	0,985
63-59	1,05	1,035
64-61	1	0,983
65-66	0,95	0,982
68-69	1,05	1,018
81-80	0,987	0,981

O primeiro modelo resolvido foi o FPORS de 118 barras caso base, sem as restrições de segurança, resultando em um custo total de \$ 134067,11. Já o caso preventivo o custo total aumentou para \$ 139476,68, pois o operador não precisa tomar nenhuma decisão já que os controles calculados já previam a interrupção do ramo 49-54. Por fim o caso corretivo (FPORSMCZOP) com um custo total de

\$ 136261,98, neste caso o operador deve tomar decisões de correção, já calculadas, caso ocorra à interrupção do ramo 49-54.

No próximo capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho.

5 Conclusões

Neste trabalho, foi proposto um modelo de FPORSMCZOP, com objetivo de considerar a realidade de um sistema elétrico, levando em conta ponto de carregamento de válvula, múltiplos combustíveis e zonas de operação proibidas, além de considerar a segurança do sistema elétrico, fornecendo ações corretivas que possam ser aplicadas após determinadas contingências.

Os testes foram realizados com os sistemas elétricos IEEE de 30, 57 e 118 barras e foram resolvidos por um método determinístico para validação do modelo apresentado, pois em todos os testes um ponto ótimo foi encontrado. O modelo foi proposto para ficar mais próximo da realidade do ponto de vista de operação, uma vez que considera as restrições físicas do sistema elétrico, bem como possíveis contingências que podem acontecer. Além disso, é possível verificar que o custo se eleva à medida que o sistema se torna seguro. O primeiro caso seguro é o preventivo, sendo o mais caro, porém é possível obter um custo menor do que o preventivo e com o mesmo nível de segurança, o caso corretivo. Neste caso os controles calculados são capazes de suportar a contingência por um determinado tempo, dando ao operador, tempo suficiente para tomar as decisões de correção, ou seja, implementação dos controles corretivos previamente calculados.

Para continuação do trabalho, a proposta é investigar metodologias para redução do tamanho do problema com contingência, resolver o novo modelo proposto do problema FPORSMCZOP para sistemas maiores, utilizar critérios de seleção de contingências e novas metodologias de resolução do modelo.

6 Bibliografia

AMJADY, N., ANSARI, M. R., Non-Convex security constrained optimal power flow by a new method composed of Benders decomposition and special ordered sets. *Ins. Trans. Electr. Energ. Syst.* 2014; 24: 842-857.

ATTARHA, A.; AMJADY, N. Solution of security constrained optimal power flow for large-scale power systems by convex transformation techniques and Taylor series. *IET Generation, Transmission & Distribution.* 2016. v. 10, Issue 4, p. 889-896.

AZEVEDO, A. T.; OLIVEIRA, A. R. L.; CASTRO, C. A.; SOARES, S. Security Constrained Optimal Active Power Flow Via Network Model And Interior Point Method. *Revista Controle & Automação.* 2009. Vol.20, n.2, p. 206-216.

BAPTISTA, E; BELATI, E; DACOSTA, G. Logarithmic barrier-augmented Lagrangian function to the optimal power flow problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Inglaterra,* 2005. v. 27, n.7, p. 528-532.

BAZARAA, M.S.; SHERALI, H.D.; SHETTY, C.M. *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms.* 1993. 2.ed. New York, John Wiley.

BHASKAR, M. M.; MUTHYALASRINIVAS; SYDULUMAHESWARAPU. Security Constraint Optimal Power Flow (SCOPF) – A Comprehensive Survey. *Transaction on Power system, protection, and distribution,* 2011 p. 11 - 20.

BOUCHEKARA, H.R.E.H., CHIAB, A. E., ABIDO, M.A. Optimal power flow using GA with a new multi-parent crossover considering: prohibited zones, valve-point effect, multi-fuels and emission. *Electr. Eng.* 2018; p. 151-165.

CARPENTIER, J. L. Contribution a L'etude du Dispatching Economique. *Bull-Soc. Fr Elec., Ser. B3,* 1962. p. 431 – 447.

CAPITANESCU, F; WEHENKEL, L. Sensitivity-based approaches for handling discrete variables in optimal power flow computations. *IEEE Transaction on Power Systems,* 2010. 25(4), 1780-1789.

CAPITANESCU, F.; MARTINEZ RAMOS, J.L.; PANCIATICI, P.; KIRSCHEN, D.; MARANO MARCOLINI, A.; PLATBROOD, L.; WEHENKEL, L. *State-of-the-art, chanllenges, and future trends in security constrained optimal power flow.* *Electric Power Systems Research* 81 2011. p. 1731-1741.

CAPITANESCU, F. Enhanced risk-based SCOPF formulation balancing operation cost and expected voluntary load shedding. *Electric Power Systems Research* 128, 2015, p. 151-155.

CHIAB, A.E., BOUCHEKARA, H.R.E.H., ABIDO, M.A. Optimal power flow with emission and non-smooth cost functions using backtracking search optimization algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016; vol. 81, pp. 64-77.

COSTA, M. T. Solução do problema de fluxo de potência ótimo com restrição de segurança e controles discretos utilizando o método primal-dual barreira logarítmica. *Dissertação – Faculdade de Engenharia Elétrica, UNESP, Bauru*, 2016.

COVA, B.; LOSIGNORE, N.; MARANNINO, P.; MONTAGNA, M. Contingency Constrained Optimal Reactive Power Flow Procedures For Voltage Control In Planning And Operation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1995. Vol. 10, No. 2, p. 602-608.

EL-HAWARY, M.E. Optimal Power Flow. In: LEONARD L. GRIGSBY. *Power System Stability and Control*. Boca Raton. CRC Press, 2006.

FIACCO, A. V.; McCORMICK, G. P. *Nonlinear programming: Sequential Unconstrained Minimization Techniques*. New York, John Wiley & Sons, 1968. p, 207.

FIACCO, A. V.; McCORMICK, G. P. *Nonlinear Programming – Sequential Unconstrained Minimization Techniques - Classics in Applied Mathematics*, Philadelphia, SIAM, v. 4, 1990.

FLETCHER, R. *Practical Methods of Optimizations*. 2nd. ed. New York, John Wiley & Sons, v.2, 1985.

FRISCH, K. R. *The logarithmic Potential Method of Convex Programming*, Memorandum. University Institute of Economics, Oslo, Norway, 1955.

HARSAN, H.; HADJSAID, N.; PRUVOT, P. Cyclic Security Analysis for Security Constrained Optimal Power Flow. *IEEE Transactions on Power Systems* 1997. Vol. 12, No. 2, p. 948-953.

KIM, J. H, PARK, J. K, KIM, B.H, PARK, J. B, HUR, D. A method of inclusion of security constraints with distributed optimal power flow *Electrical Power and Energy Systems* 2001. p. 189-194.

LIU, L.; WANG, X.; DING, X.; CHEN, H. A robust approach to optimal power flow with discrete variables. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(3) 2009, p. 1182-1190.

KARMAKAR, N. *A New Polynomial-Time Algorithm for Linear Programming. Combinatorics*, 1984, v. 4, p. 373-395.

MARCELINO, C. G., ALMEIDA, P. E. M., WANNER, E.F., BAUMANN, M., WEIL, M., CARVALHO, L. M., MIRANDA, V. Solving security constrained optimal power flow problems: a hybrid evolutionary approach. *Applied Intelligence*. 2017; p. 3672-3690.

MILANO, F.; CANIZARES, C. A.; INVERNIZZI, M. Voltage stability constrained OPF market models considering $N - 1$ contingency criteria. *Electric Power Systems Research* 74, 2005, p. 27-36.

MONTICELLI, A.; PEREIRA, M. V. F.; GRANVILLE, S. Security-Constrained Optimal Power Flow With Post-Contingency Corrective Rescheduling. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1987. Vol. PWRS-2, No. 1, p. 175-180.

PARK, B., HOLZER, J., DEMARCO, C. L. A Sparse Tableau Formulation for Node-Breaker Representations in Security-Constrained Optimal Power Flow. *IEEE Transaction on power systems*, 2019. V. 34. p. 637-647.

PINHEIRO, R. B. N.; BALBO, A.; BAPTISTA, E. C.; NEPOMUCENO, L. Interior-exterior point method with global convergence strategy for solving the reactive optimal power flow problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, v. 66, p. 235-246.

PINHEIRO, R.B.N.M., BALBO, A.R., NEPOMUCENO, L. Solving network-constrained nonsmooth economic dispatch problems through a gradient-based approach. *Electrical Power and Energy Systems*. 2019; p. 264-280.

POURAKBARI, M., LEHTONEN, M., FOTUHI, M., MARZBAND, M., MANTOVANI, J.R.S. Optimal power flow problems considering multiple-fuel options and disjoint operating zones: A solver-friendly MINLP model. *Electrical Power and Energy Systems*. 2019; p. 45-55.

RAVI, G., CHAKRABARTI, R., & CHOUDHURI, S. Nonconvex economic dispatch with heuristic load patterns using improved fast evolutionary program. *Electric Power Components and Systems*, 2006, 34(1), p. 37-45.

- ROALD, L., ANDERSSON, G. Chance-Constrained AC Optimal Power Flow: Reformulations and Efficient Algorithms. *Ieee Transactions On Power Systems*, 2017; VOL. 33, NO. 3. p. 2906-2918
- SASSON, A.M.; VILORIA, F.; ABOYTES, F. Optimal Load Flow Solutions Using the Hessian Matrix. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1973, v. 92, p. 31-41.
- SOLER, E. M.; ASADA, E. N. ; COSTA, G. R. M. . Penalty-Based Nonlinear Solver for Optimal Reactive Power Dispatch With Discrete Controls. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, v. 28, p. 2174-2182.
- VARGAS, L. S.; QUINTANA, V. H.; VANELLI, A. A Tutorial Description Of An Interior Point Method And Its Applications To Security-Constrained Economic Dispatch, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1993, Vol. 8, No. 3, p. 1315-1324.
- WALTZ, R. A., MORALES, J. L., NOCEDAL, J., ORBAN, D. An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps. *Mathematical Programming, Series, 2004, A*, **107**, 391–408.
- WALTZ, R. A., NOCEDAL, J. “Knitro User’s Manual”, Technical Report, Ziena Optimization, Evanston, Il, Usa. 2003.
- WALTZ, R. A., PLATENGA, T. D. “Knitro User’s Manual. Version 6.0”, Technical Report, Ziena Optimization Inc., Evanston, Il, Usa. 2009.
- WALTZ, R. A., PLATENGA, T. D. “Knitro User’s Manual. Version 7.0”, Technical Report, Ziena Optimization, Evanston, Il, Usa. 2010.
- WINFIELD, D. Function minimization by interpolation in a data table. *J. Inst. Maths Applics*, **12**, 1973, 339–347.
- WANG, Q.; MCCALLEY, J. D.; ZHENG, T.; LITVINOV, E. Solving corrective risk-based security-constrained optimal power flow with Lagrangian relaxation and Benders decomposition. *Electrical Power and Energy Systems* 75, 2015, p. 255-264.
- WRIGHT, S. J. Primal-Dual Interior-Point Methods. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, Philadelphia. 1997.
- XAXIVER, A. E. & XAVIER, V. L. Solving the minimum sum-of-squares clustering problem by hyperbolic smoothing and partition into boundary and gravitational regions. *Pattern Recognition*, 2011, 44(1), 70–77.

YAN, X.; QUINTANA, V. H. An Efficient Predictor-Corrector Interior Point Algorithm for Security-Constrained Economic Dispatch. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, Vol. 12, No. 2, p. 803-810.

ZHANG, R., DONG, Z. Y., XU, Y., WONG, K. P., LAI, M. Hybrid Computation of Corrective security-constrained optimal power flow problems. IET Generation, Transmission & Distribution. 2013. Vol 8. pp.995-1006.

7 Anexo

Abaixo são apresentados os limites dos fluxos de potência nos ramos de transmissão da barra origem BO para barra destino BD para o longo, curto e médio prazo.

Tabela 27 - Limites dos fluxos dos ramos do sistema de 30 barras

BO	BD	L^L	L^S	L^M
1	2	1,3	1,56	1,43
1	3	1,3	1,56	1,43
2	4	0,65	0,78	0,715
3	4	1,3	1,56	1,43
2	5	1,3	1,56	1,43
2	6	0,65	0,78	0,715
4	6	0,9	1,08	0,99
5	7	0,7	0,84	0,77
6	7	1,3	1,56	1,43
6	8	0,32	0,384	0,352
6	9	0,65	0,78	0,715
6	10	0,32	0,384	0,352
9	11	0,65	0,78	0,715
9	10	0,65	0,78	0,715
4	12	0,65	0,78	0,715
12	13	0,65	0,78	0,715
12	14	0,32	0,384	0,352
12	15	0,32	0,384	0,352
12	16	0,32	0,384	0,352
14	15	0,16	0,192	0,176
16	17	0,16	0,192	0,176
15	18	0,16	0,192	0,176
18	19	0,16	0,192	0,176
19	20	0,32	0,384	0,352
10	20	0,32	0,384	0,352
10	17	0,32	0,384	0,352
10	21	0,32	0,384	0,352
10	22	0,32	0,384	0,352
21	22	0,32	0,384	0,352
15	23	0,16	0,192	0,176
22	24	0,16	0,192	0,176
23	24	0,16	0,192	0,176
24	25	0,16	0,192	0,176

25	26	0,16	0,192	0,176
25	27	0,16	0,192	0,176
28	27	0,65	0,78	0,715
27	29	0,16	0,192	0,176
27	30	0,16	0,192	0,176
29	30	0,16	0,192	0,176
8	28	0,32	0,384	0,352
6	28	0,32	0,384	0,352

Tabela 28 - Limites dos fluxos dos ramos do sistema de 57 barras

BO	BD	L^L	L^S	L^M
1	2	1	1,2	1,1
2	3	2	2,4	2,2
3	4	2	2,4	2,2
4	5	0,8	0,96	0,88
4	6	0,9	1,08	0,99
6	7	1	1,2	1,1
6	8	0,8	0,96	0,88
8	9	0,75	0,9	0,825
9	10	0,32	0,384	0,352
9	11	0,45	0,54	0,495
9	12	0,41	0,492	0,451
9	13	0,65	0,78	0,715
13	14	0,9	1,08	0,99
13	15	1,4	1,68	1,54
1	15	3	3,6	3,3
1	16	2	2,4	2,2
1	17	2	2,4	2,2
3	15	1	1,2	1,1
4	18	0,34	0,408	0,374
4	18	0,42	0,504	0,462
5	6	0,52	0,624	0,572
7	8	0,3	0,36	0,33
10	12	0,7	0,84	0,77
11	13	0,82	0,984	0,902
12	13	0,32	0,384	0,352
12	16	1	1,2	1,1
12	17	1	1,2	1,1
14	15	1,4	1,68	1,54
18	19	0,28	0,336	0,308
19	20	0,32	0,384	0,352
21	20	0,28	0,336	0,308
21	22	0,28	0,336	0,308

22	23	0,41	0,492	0,451
23	24	0,32	0,384	0,352
24	25	0,28	0,336	0,308
24	25	0,32	0,384	0,352
24	26	0,28	0,336	0,308
26	27	0,28	0,336	0,308
27	28	0,32	0,384	0,352
28	29	0,36	0,432	0,396
7	29	1	1,2	1,1
25	30	0,28	0,336	0,308
30	31	0,28	0,336	0,308
31	32	0,32	0,384	0,352
32	33	0,32	0,384	0,352
34	32	0,32	0,384	0,352
34	35	0,34	0,408	0,374
35	36	0,38	0,456	0,418
36	37	0,4	0,48	0,44
37	38	0,5	0,6	0,55
37	39	0,28	0,336	0,308
36	40	0,28	0,336	0,308
22	38	0,42	0,504	0,462
11	41	0,28	0,336	0,308
41	42	0,28	0,336	0,308
41	43	0,36	0,432	0,396
38	44	0,8	0,96	0,88
15	45	1	1,2	1,1
14	46	1	1,2	1,1
46	47	1	1,2	1,1
47	48	0,5	0,6	0,55
48	49	0,28	0,336	0,308
49	50	0,32	0,384	0,352
50	51	0,28	0,336	0,308
10	51	0,5	0,6	0,55
13	49	0,5	0,6	0,55
29	52	0,36	0,432	0,396
52	53	0,32	0,384	0,352
53	54	0,28	0,336	0,308
54	55	0,32	0,384	0,352
11	43	0,32	0,384	0,352
44	45	1	1,2	1,1
40	56	0,28	0,336	0,308
56	41	0,28	0,336	0,308
56	42	0,28	0,336	0,308
39	57	0,28	0,336	0,308
57	56	0,28	0,336	0,308

38	49	0,28	0,336	0,308
38	48	0,36	0,432	0,396
9	55	0,5	0,6	0,55

Tabela 29 - Limites dos fluxos dos ramos do sistema de 118 barras

BO	BD	L^L	L^S	L^M
1	2	1,3	1,625	1,43
1	3	0,32	0,4	0,352
4	5	1,2	1,5	1,32
3	5	0,7	0,875	0,77
5	6	1	1,25	1,1
6	7	0,36	0,45	0,396
8	9	4,4	5,5	4,84
8	5	4	5	4,4
9	10	4,8	6	5,28
4	11	0,7	0,875	0,77
5	11	0,8	1	0,88
11	12	0,32	0,4	0,352
2	12	0,34	0,425	0,374
3	12	0,2	0,25	0,22
7	12	0,2	0,25	0,22
11	13	0,4	0,5	0,44
12	14	0,2	0,25	0,22
13	15	0,1	0,125	0,11
14	15	0,1	0,125	0,11
12	16	0,1	0,125	0,11
15	17	2	2,5	2,2
16	17	0,32	0,4	0,352
17	18	0,8	1	0,88
18	19	0,28	0,35	0,308
19	20	0,13	0,1625	0,143
15	19	0,13	0,1625	0,143
20	21	0,36	0,45	0,396
21	22	0,5	0,625	0,55
22	23	0,6	0,75	0,66
23	24	0,12	0,15	0,132
23	25	1,6	2	1,76
26	25	1	1,25	1,1
25	27	1,5	1,875	1,65
27	28	0,45	0,5625	0,495
28	29	0,26	0,325	0,286
30	17	2,5	3,125	2,75
8	30	0,7	0,875	0,77

26	30	2,5	3,125	2,75
17	31	0,32	0,4	0,352
29	31	0,22	0,275	0,242
23	32	1,2	1,5	1,32
31	32	0,38	0,475	0,418
27	32	0,14	0,175	0,154
15	33	0,12	0,15	0,132
19	34	0,12	0,15	0,132
35	36	0,12	0,15	0,132
35	37	0,5	0,625	0,55
33	37	0,32	0,4	0,352
34	36	0,38	0,475	0,418
34	37	1,4	1,75	1,54
38	37	2,5	3,125	2,75
37	39	0,5	0,625	0,55
37	40	0,4	0,5	0,44
30	38	0,67	0,8375	0,737
39	40	0,12	0,15	0,132
40	41	0,32	0,4	0,352
40	42	0,2	0,25	0,22
41	42	0,3	0,375	0,33
43	44	0,2	0,25	0,22
34	43	0,2	0,25	0,22
44	45	0,4	0,5	0,44
45	46	0,5	0,625	0,55
46	47	0,4	0,5	0,44
46	48	0,32	0,4	0,352
47	49	0,32	0,4	0,352
42	49	0,6	0,75	0,66
42	49	0,6	0,75	0,66
45	49	0,66	0,825	0,726
48	49	0,5	0,625	0,55
49	50	0,6	0,75	0,66
49	51	0,7	0,875	0,77
51	52	0,38	0,475	0,418
52	53	0,14	0,175	0,154
53	54	0,25	0,3125	0,275
49	54	0,5	0,625	0,55
49	54	0,5	0,625	0,55
54	55	0,12	0,15	0,132
54	56	0,12	0,15	0,132
55	56	0,18	0,225	0,198
56	57	0,32	0,4	0,352
50	57	0,4	0,5	0,44
56	58	0,11	0,1375	0,121

51	58	0,25	0,3125	0,275
54	59	0,38	0,475	0,418
56	59	0,36	0,45	0,396
56	59	0,32	0,4	0,352
55	59	0,36	0,45	0,396
59	60	0,5	0,625	0,55
59	61	0,6	0,75	0,66
60	61	1,5	1,875	1,65
60	62	0,18	0,225	0,198
61	62	0,4	0,5	0,44
63	59	1,6	2	1,76
63	64	1,62	2,025	1,782
64	61	0,5	0,625	0,55
38	65	1,68	2,1	1,848
64	65	2	2,5	2,2
49	66	1,32	1,65	1,452
49	66	1,32	1,65	1,452
62	66	0,5	0,625	0,55
62	67	0,34	0,425	0,374
65	66	0,28	0,35	0,308
66	67	0,64	0,8	0,704
65	68	0,64	0,8	0,704
47	69	0,64	0,8	0,704
49	69	0,5	0,625	0,55
68	69	1,5	1,875	1,65
69	70	0,82	1,025	0,902
24	70	0,22	0,275	0,242
70	71	0,32	0,4	0,352
24	72	0,12	0,15	0,132
71	72	0,26	0,325	0,286
71	73	0,14	0,175	0,154
70	74	0,5	0,625	0,55
70	75	0,4	0,5	0,44
69	75	1,2	1,5	1,32
74	75	0,52	0,65	0,572
76	77	0,6	0,75	0,66
69	77	0,92	1,15	1,012
75	77	0,32	0,4	0,352
77	78	0,7	0,875	0,77
78	79	0,34	0,425	0,374
77	80	0,5	0,625	0,55
77	80	1	1,25	1,1
79	80	0,72	0,9	0,792
68	81	0,32	0,4	0,352
81	80	0,32	0,4	0,352

77	82	0,38	0,475	0,418
82	83	0,38	0,475	0,418
83	84	0,3	0,375	0,33
83	85	0,5	0,625	0,55
84	85	0,5	0,625	0,55
85	86	0,32	0,4	0,352
86	87	0,14	0,175	0,154
85	88	0,5	0,625	0,55
85	89	0,76	0,95	0,836
88	89	1,2	1,5	1,32
89	90	1,4	1,75	1,54
89	90	0,8	1	0,88
90	91	0,16	0,2	0,176
89	92	0,64	0,8	0,704
89	92	2	2,5	2,2
91	92	0,34	0,425	0,374
92	93	0,5	0,625	0,55
92	94	0,46	0,575	0,506
93	94	0,44	0,55	0,484
94	95	0,46	0,575	0,506
80	96	0,45	0,5625	0,495
82	96	0,32	0,4	0,352
94	96	0,32	0,4	0,352
80	97	0,5	0,625	0,55
80	98	0,45	0,5625	0,495
80	99	0,36	0,45	0,396
92	100	0,32	0,4	0,352
94	100	0,4	0,5	0,44
95	96	0,18	0,225	0,198
96	97	0,36	0,45	0,396
98	100	0,16	0,2	0,176
99	100	0,38	0,475	0,418
100	101	0,12	0,15	0,132
92	102	0,42	0,525	0,462
101	102	0,4	0,5	0,44
100	103	1	1,25	1,1
100	104	0,6	0,75	0,66
103	104	0,48	0,6	0,528
103	105	0,5	0,625	0,55
100	106	0,6	0,75	0,66
104	105	0,4	0,5	0,44
105	106	0,32	0,4	0,352
105	107	0,32	0,4	0,352
105	108	0,18	0,225	0,198
106	107	0,22	0,275	0,242

108	109	0,14	0,175	0,154
103	110	0,5	0,625	0,55
109	110	0,14	0,175	0,154
110	111	0,5	0,625	0,55
110	112	0,5	0,625	0,55
17	113	0,16	0,2	0,176
32	113	0,12	0,15	0,132
32	114	0,22	0,275	0,242
27	115	0,36	0,45	0,396
114	115	0,12	0,15	0,132
68	116	2	2,5	2,2
12	117	0,4	0,5	0,44
75	118	0,62	0,775	0,682
76	118	0,32	0,4	0,352
