



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia

FEUP

Departamento de Engenharia
Electrotécnica e de Computadores

AVALIAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DA REDE DE TRANSPORTE DE ENERGIA ELÉCTRICA EM AMBIENTE LIBERALIZADO

Eduardo Miguel Teixeira Mendonça Gouveia

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

Trabalho co-financiado pelo Programa Operacional Ciência e Inovação (POCI
2010) e pelo Fundo Social Europeu (FSE), no âmbito da Bolsa de Doutoramento
SFRH/BD/30263/2006 da Fundação para a Ciência e a Tecnologia



Programa Operacional Ciência e Inovação 2010
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR



Porto, Janeiro de 2009

Aos homens e mulheres que diariamente operam, estudam e planeiam o mundo dos sistemas eléctricos de energia

À Sónia e à Carolina

AGRADECIMENTOS

Para a realização deste trabalho, foi necessária a colaboração, atenção e apoio de algumas pessoas, a quem gostaria de expressar a minha profunda gratidão.

Agradeço ao Professor Doutor Manuel Matos pela sua orientação, amizade, conselhos, constante exigência e apoio manifestado em todas as fases do trabalho.

À minha família, em particular à Sónia Maria, minha mulher, pelo amor e motivação nos momentos difíceis. Aos meus pais, Eduardo e Manuela, minha irmã Ana e sobrinho Eduardo pela compreensão para a minha ausência, motivada pelas distâncias físicas “agravadas” com a responsabilidade assumida com este trabalho. Uma palavra para os meus cunhados, Cláudia e Miguel e meus sogros Fernanda e Teixeira pela amizade e apoio demonstrado. Também à minha prima Cláudia pelo trabalho de revisão dos resumos.

Aos meus amigos, que de uma forma ou de outra contribuíram, com sugestões, comentários ou simplesmente pelo apoio moral.

Ao Departamento de Engenharia Electrotécnica da Escola Superior de Tecnologia de Viseu integrada no Instituto Politécnico de Viseu, no qual sou assistente, pelo incentivo e condições concedidas relativamente a horários e recursos.

Finalmente, agradeço à Fundação para a Ciência e Tecnologia, o apoio financeiro concedido através da bolsa de investigação (SFRH/BD/30263/2006).

A reestruturação do sector eléctrico em todo o mundo conduziu à separação das actividades de produção, transporte, distribuição e comercialização, anteriormente verticalmente integradas. Entre outras consequências, estas alterações levaram à necessidade de avaliação da adequação do sistema de transporte de forma separada do sistema de produção, portanto fora do paradigma clássico, que consistia na avaliação do sistema composto (produção e transporte).

A avaliação da adequação da rede de transporte, neste sentido, e de acordo com a Directiva Europeia 2003/54/EC, refere-se à capacidade do sistema para satisfazer “pedidos razoáveis de transporte de transporte de electricidade”, função das potências geradas e consumidas nos barramentos da rede.

Nesta dissertação é proposta uma metodologia que serve este propósito e que integra a incerteza nos pedidos de procura de electricidade modelizados com recurso à teoria dos conjuntos difusos (*fuzzy set theory*). Esta ferramenta constitui um trânsito de potência difuso cujo objectivo é a avaliação exclusiva do comportamento do sistema de transporte para satisfazer pedidos de transporte de electricidade (produção ou consumo) em ambiente de liberalizado.

A adequação da rede de transporte é analisada de forma independente sendo devidamente quantificada a partir de índices definidos para o efeito. Estes índices permitem identificar a repressão (limitações aos pedidos de transporte) existente na rede resultado dos seus limites técnicos/operacionais. Esta metodologia é simétrica, no sentido em que todos os barramentos apresentam uma potência especificada (distribuições de possibilidade) incluindo o barramento de compensação. Mais ainda, não se faz recurso a linearizações como sucede nas metodologias tradicionais de trânsito de potências difuso. Para ilustrar a aplicação da metodologia utilizaram-se várias redes de teste do IEEE (14, 24, 30 e 118 barramentos).

A metodologia proposta permite, além de localizar as zonas (barramentos) da rede onde existirá inadequação, a identificação de quais os reforços mais promissores com vista à diminuição ou eliminação dessa inadequação. Desta forma, pode a ferramenta desenvolvida

ser enquadrada em estudos de planeamento permitindo a definição e quantificação de reforços.

A metodologia proposta pode também ser integrada em estudos determinísticos ou probabilísticos destinados a avaliar a segurança da rede. De facto é testada a sua aplicação no critério determinístico (N-1) e esclarecido como pode ser integrada com critérios probabilísticos considerando o efeito (estados) dos componentes para obtenção de um valor esperado de adequação da rede de transporte.

Pretende-se assim com este trabalho dar uma contribuição que sirva objectivos de operadores da rede de transporte e reguladores em ambiente de mercado. No primeiro caso este contributo consiste no auxílio ao processo de planeamento. No segundo caso refere-se à identificação de patamares mínimos para a adequação da rede de transporte com propósitos de regulação e respectiva monitorização.

ABSTRACT

The recent changes in the organization of the electric sector all over the world forced the unbundling of the generation, transmission, distribution and commercialization activities, previously integrated vertically in the traditional utilities. Among many other consequences, these changes lead to the need of evaluating the adequacy of the transmission system independently of the generation system. This falls outside of the classical paradigm of the assessment of the adequacy for composite power system (generation and transmission).

The assessment of the transmission network adequacy, according to the European Union Directive 2003/54/EC, refers to the ability of the system to meet “reasonable demands for the transmission of electricity”, as a result of generation and loads demands at the network buses.

In this dissertation is proposed a methodology that serves this purpose where the uncertainties at “reasonable demands” are modeled using fuzzy set theory. This tool is a fuzzy power flow which scope is evaluate the behavior of the transmission system to meet requests for transmission of electricity (production or consumption) in the electricity market.

The adequacy of the transmission system is quantified by indices defined for this purpose. These indices identify the repression (limits at transmission requests) in the network as a result of its technical/ operational limits. This methodology is symmetrical in the sense that all buses have a specified power (possibility distribution), slack bus included. Moreover, there is no recourse to linearizations as happens at traditional methods of fuzzy power flow. To illustrate the application of the methodology were used several IEEE test networks (14, 24, 30 and 118 buses).

The proposed methodology identifies the points (buses) where the network is not adequate. Also is possible the identification of the most promising reinforcements which decreases or eliminate that inadequacy. Therefore, the developed toll can be used for transmission network planning purposes allowing the definition and quantification of reinforcements.

This methodology can also be integrated with deterministic or probabilistic criteria's to assess the security of the network. In this work we test its application in the deterministic criterion

(N-1) and explain how it can be integrated with probabilistic criteria. Here we consider the effect (states) of components to obtain an expected value for the transmission network adequacy.

Finally, we believe this work may provide a contribution to serve targets of the transmission system operators and regulators in market environment. In the first case this contribution is to aid the planning process. In the second case the contribution concerns to the identification of minimum thresholds for the adequacy of the transmission network with the purpose of regulation and monitoring.

La réorganisation du secteur électrique en tout le monde a conduit à la séparation des activités de production, transport, distribution et commercialisation, précédemment et verticalement intégrées. Entre autres conséquences, ces modifications ont conduit à la nécessité d'évaluation de l'adéquation du système de transport, donc excepté du paradigme classique, qui consistait en l'évaluation du système intégré (production et transport).

L'évaluation de l'adéquation du réseau de transport, dans ce sens, et conformément à la Directive Européenne 2003/54/EC, il se rapporte à la capacité du système de satisfaire "demandes raisonnables de transport d'électricité", en fonction de las puissances produits et consommés dans les noeuds du réseau électrique.

Dans ce dissertation il est proposée un méthodologie qui sert cette intention et qui intègre l'incertitude dans les demandes de recherche d'électricité modélisés avec ressource à la théorie des ensembles diffus (*fuzzy set theory*). Cet outil constitue dans un transit de pouvoir diffus dont l'objectif est l'évaluation exclusive du comportement du système de transport pour satisfaire demandes de transport d'électricité (production ou consommation) en environnement libéralisé.

L'adéquation de réseau de transport est analysée de manière indépendant en étant dûment quantifiée à partir des indices définis pour l'effet. Ces indices permettent identifier la répression (limitations aux demandes de transport) existant en réseau, résultat de ses limitations techniciens/opérationnels. Cette méthodologie est symétrique, dans le sens en qui tous les noeuds présentent une puissance spécifique (distribution de possibilité), y compris le noeud de compensation. Mais aussi, on ne fait pas ressource à linéarisations comme réussit dans les, méthodes traditionnels de transit de pouvoirs diffus. Pour illustrer l'application des méthodes ils se sont utilisés plusieurs réseaux de test du IEEE (14, 24,30 et 118 noeuds).

La méthodologie proposée permet, localiser zones (noeuds) de réseau où existera inadéquation, l'identification des renforcements plus prometteurs avec l'objectif de diminution

ou élimination de cette inadéquation. Dans cette forme, peut le outil développé être encadré dans les études de planification en permettant la définition et quantification de renforcements. La méthodologie proposée peut être aussi intégré en études déterministes ou probabilistes destinés à évaluer la sécurité du réseau. En effet, il a été testé son application sur le critère déterministe (N-1) et expliqué comment il peut être intégré à l'examen des critères probabilistes en considérant l'effet (les états), des composants pour obtenir une valeur espérée de l'adéquation du réseau de transport.

Il se prétend ainsi avec ce travail donner une contribution qui serve objectifs de opérateurs de réseau de transport et régulateurs en environnement de marché. Dans le premier cas, cette contribution consiste dans l'aide au processus de planification. Le second cas est de identification des valeurs minimums pour l'adéquation de réseau de transport avec les intentions de règlement respective surveillance.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJECTIVOS	3
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DA ADEQUAÇÃO DA REDE

2.1 INTRODUÇÃO	7
2.2 REESTRUTURAÇÃO DO SECTOR ELÉCTRICO	13
2.2.1 MARCOS PARA A INCERTEZA EM PORTUGAL	16
2.3 ELEMENTOS DO PLANEAMENTO CLÁSSICO DA REDE DE TRANSPORTE	17
2.4 METODOLOGIAS CLÁSSICAS PARA TRÂNSITOS DE POTÊNCIA (TP)	21
2.4.1 MODELOS DETERMINÍSTICOS DE TP	22
2.4.2 MODELOS PROBABILÍSTICOS DE TP	28
2.4.3 MODELOS POSSIBILÍSTICOS DE TP	35
2.4.3.1 ESPECIFICAÇÃO DAS POTÊNCIAS INJECTADAS	38
2.4.3.2 FORMULAÇÕES TRADICIONAIS DO TRÂNSITO DE POTÊNCIAS DIFUSO	39
2.4.4 TRÂNSITO DE POTÊNCIAS ÓPTIMO	47
2.5 AVALIAÇÃO CLÁSSICA DA FIABILIDADE DE UM SISTEMA ELÉCTRICO DE ENERGIA	52
2.6 TÉCNICAS DE SELECÇÃO DE ESTADOS PARA TP OU EM ESTUDOS DE FIABILIDADE	56
2.7 NOTA ÀS APLICAÇÕES COMERCIAIS PARA AVALIAÇÃO DA FIABILIDADE	61
2.8 CONCLUSÕES	62

CAPÍTULO 3

TRÂNSITO DE POTÊNCIA DIFUSO SIMÉTRICO

3.1 INTRODUÇÃO	63
3.2 CONGESTIONAMENTO E REPRESSÃO	65
3.3 TRÂNSITO DE POTÊNCIA DC DIFUSO SIMÉTRICO (DC SFPP)	69
3.3.1 EXEMPLO ILUSTRATIVO COMPARANDO VERSÕES CLÁSSICAS DO FPF COM O SFPP	71
3.4 TRÂNSITO DE POTÊNCIA DC DIFUSO CONSTRANGIDO (DC CFPP)	74

3.5 TRÂNSITO DE POTÊNCIA AC DIFUSO SIMÉTRICO (AC SFPP)	78
3.6 TRÂNSITO DE POTÊNCIA AC DIFUSO CONSTRANGIDO (AC CFPP)	80
3.7 QUANTIFICAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DA REDE DE TRANSPORTE	83
3.7.1 UM PEQUENO EXEMPLO PARA O SFPP/CFPP	85
3.8 AS REPRESSÕES BÁSICAS	89
3.9 CASO DE ESTUDO: APLICAÇÃO DO CFPP À REDE DE 24 BARRAMENTOS DO IEEE	91
3.10 CASO DE ESTUDO: APLICAÇÃO DO CFPP À REDE DE 118 BARRAMENTOS DO IEEE	97
3.11 DIFERENÇAS DO SFPP PARA OUTRAS METODOLOGIAS	103
3.12 APLICAÇÃO DO CFPP PERANTE ALTERAÇÕES DA ESTRUTURA DA REDE	111
3.12.1 CONFIGURAÇÃO DA REDE E RESULTADOS PARA A SEVERIDADE DE REPRESSÃO, CASO BASE	111
3.12.2 ALTERAÇÕES NA REDE A CONSIDERAR	114
3.12.3 RESULTADOS PARA AS ALTERAÇÕES NA REDE	115
3.12.4 EFEITOS INDESEJADOS RESULTANTES DA EXPANSÃO DA RT	121
3.13 CONCLUSÕES	123

CAPÍTULO 4

MELHORIA DA ADEQUAÇÃO DA REDE DE TRANSPORTE DE ENERGIA ELÉCTRICA

4.1. INTRODUÇÃO	125
4.2. METODOLOGIA PARA MELHORIA DE ADEQUAÇÃO DA REDE DE TRANSPORTE	126
4.3 DADOS DO CFPP - CASO BASE	140
4.4 DC CFPP NA MELHORIA DA ADEQUAÇÃO	141
4.4.1 RESULTADOS PARA A ADEQUAÇÃO DA REDE APLICANDO O DC CFPP – CASO BASE	141
4.4.2 EVOLUÇÃO DOS VALORES DUAIS	144
4.4.3 ESTUDO DE CASO	146
4.4.3.1 IDENTIFICAÇÃO DE OPÇÕES PARA REFORÇO DA REDE E SUA SIMULAÇÃO	146
4.4.3.2 POTÊNCIA PERMITIDA E POTÊNCIA ESPECIFICADA	150
4.5 AC CFPP NA MELHORIA DA ADEQUAÇÃO	157
4.5.1 RESULTADOS PARA A ADEQUAÇÃO DA REDE APLICANDO O AC CFPP – CASO BASE	157
4.5.2 EVOLUÇÃO DOS VALORES DUAIS	160
4.5.3 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA INCREMENTAL	161
4.5.4 ESTUDO DE CASO	165
4.5.4.1 IDENTIFICAÇÃO DE OPÇÕES PARA REFORÇO DA REDE E SUA SIMULAÇÃO	165
4.5.4.2 POTÊNCIA PERMITIDA E POTÊNCIA ESPECIFICADA	169
4.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O DC CFPP E AC CFPP	178
4.7 CONCLUSÕES	179

5.1 INTRODUÇÃO	181
5.2 INTEGRAÇÃO DO CFPF EM ANÁLISE DE SEGURANÇA (N-1)	183
5.2.1 AVALIAÇÃO DE ESTADOS DE CONTINGÊNCIA	183
5.2.2 SUGESTÕES PARA REFORÇOS	184
5.3 INTEGRAÇÃO DO CFPF EM ANÁLISE DE SEGURANÇA DO TIPO PROBABILÍSTICO	190
5.4 INTEGRAÇÃO DO CFPF EM ANÁLISE DE SEGURANÇA (N-1): ESTUDO DE CASO	194
5.4.1 CASO BASE E AVALIAÇÃO DOS ESTADOS DE CONTINGÊNCIA	194
5.4.2 SUGESTÕES DE REFORÇO	201
5.5 CRITÉRIOS PROBABILÍSTICOS UTILIZANDO O CFPF: PEQUENO EXEMPLO	212
5.6 CONCLUSÕES	215

6.1 CONCLUSÕES	217
6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	219

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	221
-----------------------------------	------------

ANEXO A - APLICAÇÕES COMERCIAIS EM FIABILIDADE	A-1
ANEXO B - DADOS E RESULTADOS PARA AS REDES DE TESTE	B-1
ANEXO C - ARTIGOS CIENTÍFICOS PUBLICADOS NO ÂMBITO DA DISSERTAÇÃO	C-1

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A reestruturação do sector eléctrico que decorre desde a década de 80 trouxe alterações à forma de realizar o planeamento dos sistemas eléctricos de energia (SEE). É abandonada uma estrutura monopolista verticalmente integrada, com a mesma entidade a ser responsável pelas diversas áreas funcionais (produção, transporte e distribuição) e passa a existir mercado permitindo a concorrência ao nível da produção e da comercialização. A reestruturação permitiu assim liberdade no comércio de energia eléctrica às empresas do sector eléctrico e liberdade de escolha do consumidor que pode optar pelo fornecedor que considerar mais adequado. Ou seja, existe concorrência entre produtores e entre fornecedores e surgem os mercados organizados de energia.

Contudo, a actividade de transporte, tal como a de distribuição, permanece um monopólio existindo uma entidade responsável que, entre outras tarefas, terá de realizar o planeamento da rede de transporte. Este processo deverá conduzir a elevados padrões de qualidade no novo ambiente de mercado e deverá evitar barreiras ao livre comércio. No caso do mercado europeu, também a cooperação horizontal entre os operadores de rede de transporte assume uma maior importância já que o reforço das redes terá que ser considerado de forma a permitir o desenvolvimento do comércio, em particular do comércio transfronteiriço. O planeamento da rede de transporte é assim realizado num ambiente que contempla várias incertezas, consequência da evolução no sector.

Tradicionalmente o processo de planeamento era realizado para o sistema de produção e transporte em simultâneo. Com a liberalização do sector passa a existir uma separação destas actividades. Assim o operador da rede de transporte deverá realizar a avaliação da adequação da rede de forma separada do sistema produtor. São responsabilidades do operador da rede de transporte [Directiva 2003/54/EC]:

“(...) o operador da rede de transporte é responsável por:

- a) Assegurar a capacidade a longo prazo da rede para atender pedidos razoáveis de transporte de electricidade;
- b) Contribuir para a segurança do fornecimento através de uma capacidade de transporte adequada e da fiabilidade do sistema; (...)”

O operador deverá assim ter capacidade de longo prazo para satisfazer “pedidos razoáveis de transporte de electricidade”. Para assegurar capacidade de longo prazo são realizados estudos de planeamento da rede de transporte (RT). Com vista a realizar o planeamento da RT, o operador deverá avaliar a adequação da rede.

Em ambiente de planeamento deverá o operador saber como melhorar a adequação da RT. Por exemplo, quais os ramos que devem ser reforçados para satisfazer um dado valor de adequação? Qual a adequação do sistema de transporte para um dado conjunto de contingências? Qual o efeito de eventuais congestionamentos sobre os pedidos de transporte?

Sendo a actividade de transporte um monopólio natural, a existência de congestionamentos na RT condicionará agentes de produção e agentes de consumo (clientes finais, cooperativas, comercializadores de último recurso) restringindo um mercado eléctrico que se pretende competitivo. O reforço da rede permitirá resolver este tipo de problemas e melhorar assim a eficiência económica do mercado eléctrico.

Com a finalidade de responder aos problemas colocados é apresentada nesta dissertação uma nova metodologia que permite avaliar a adequação do sistema de transporte de forma independente do sistema produtor na satisfação dos “pedidos razoáveis de transporte de electricidade”. Sobre esta foram implementadas estratégias capazes de quantificar medidas de reforço da rede de forma concertada permitindo obter as respostas às perguntas colocadas e garantindo a escolha das opções mais promissoras no que se refere à diminuição da inadequação da RT. É ainda mostrado como a nova metodologia pode ser utilizada em estudos de segurança estacionária com critérios probabilísticos e critérios determinísticos.

1.2 OBJECTIVOS

Esta dissertação resulta de um trabalho realizado numa área de investigação ligada aos problemas relacionados com o planeamento da expansão de sistemas eléctricos.

Com o trabalho desenvolvido nesta dissertação pretende-se auxiliar o operador da rede de transporte no processo de planeamento da rede em ambiente liberalizado. Para esse efeito é proposta uma metodologia que permite ao operador da rede calcular a adequação da rede de forma independente do sistema produtor sendo a modelização da incerteza realizada a partir de conjuntos difusos. Com efeito, os “pedidos razoáveis de electricidade” são tratados como especificações difusas de produção e de consumo. Em consequência, esta metodologia constitui uma ferramenta de análise de sistemas eléctricos que encaixa na categoria dos trânsitos de potência difusos. A integração de modelos difusos em trânsitos de potência não constitui de todo uma novidade. No entanto, as formulações tradicionais são normalmente orientadas para o sistema composto (produção e transporte), o que não permite avaliar de forma independente a rede de transporte. Além deste aspecto, as formulações clássicas apresentam alguns problemas, como as linearizações ou a ausência de simetria (no sentido em que todos os barramentos não são tratados na mesma forma no que se refere à especificação de potências), que se ultrapassaram com a presente metodologia. Trata-se portanto de uma análise exclusivamente da rede de transporte, fora do paradigma clássico do sistema composto, e que não considera preocupações com questões económicas.

Os objectivos deste trabalho podem ser sintetizados da forma seguinte:

- a) Desenvolvimento de uma ferramenta direccionada para avaliação da adequação do sistema de transporte em separado do sistema produtor (de acordo com o espírito da Directiva 2003/54/CE);
- b) Modelização do conceito “pedidos razoáveis de transporte de electricidade” através de conjuntos difusos;
- c) Desenvolvimento de uma metodologia simétrica, capaz de garantir que todos os barramentos são tratados da mesma forma no que se refere à concentração de incertezas e fora do paradigma clássico da consideração de um barramento de compensação;
- d) Desenvolvimento de uma metodologia que garanta resultados exactos dispensando o recurso a linearizações;

- e) A partir da metodologia simétrica desenvolver uma versão capaz de considerar os limites técnicos dos ramos (constrangimentos), de forma a permitir observar congestionamentos, assim como suas consequências nos pedidos razoáveis de transporte de electricidade;
- f) Com base na metodologia simétrica com constrangimentos, definição de índices para avaliar a adequação da rede de transporte em termos locais ou globais;
- g) Aplicação da metodologia nas situações normais de planeamento do sistema de transporte, contemplando rede em regime normal, rede em regime de contingência ou construção de novos elementos sobre o quadro da estrutura existente;
- h) Definição de uma metodologia onde se identifiquem os reforços mais promissores e o seu valor, com vista a aumentar a adequação da rede;
- i) Integração da metodologia proposta em estudos de segurança estacionária.

Em síntese, tais objectivos poderão servir operadores do sistema de transporte em processos de planeamento e em simultâneo os reguladores na definição de padrões mínimos de adequação para a rede de transporte e no respectivo controlo.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 2 trata o estado da arte no que se refere à adequação da rede de transporte. Começa por se realizar uma análise à evolução do sector eléctrico e em seguida são identificados os elementos clássicos do planeamento da RT. São também estudadas as ferramentas básicas de análise de sistemas eléctricos, em concretos os trânsitos de potência. Nesse contexto são identificadas as formulações clássicas separando-se modelos determinísticos, probabilísticos e possibilísticos. É ainda realizada uma breve referência a estudos de fiabilidade no sistema composto.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia proposta para avaliação da adequação do sistema de transporte. Esta metodologia, que se integra nos problemas de trânsito de potência difusos, constitui a base do trabalho desenvolvido. É desenvolvida uma versão para o modelo completo (caso AC) e uma versão para o modelo DC com vista à obtenção de resultados aproximados (garantindo em ambos os casos, resultados simétricos). Em seguida, a metodologia é expandida de forma a incluir as limitações técnicas dos ramos. São definidos os índices locais e globais para quantificação da adequação da rede. Nesta altura é introduzido o conceito de repressão que permite a análise das limitações aos pedidos de transporte de electricidade. São definidos alguns casos de estudo (utilizando redes de teste da IEEE), onde por meio dos índices referidos é observado o efeito dos congestionamentos nos ramos sobre os barramentos. A metodologia proposta é ainda comparada com as metodologias clássicas de trânsito de potências difuso. Finalmente, a metodologia é aplicada quando ocorrem alterações da configuração inicial da rede.

No Capítulo 4 é definido um processo baseado em valores duais, que fornece indicação dos reforços a realizar, com vista a melhorar a adequação da rede. Esta técnica é aplicada sobre a metodologia proposta no Capítulo 3 e permite obter a melhoria da adequação da rede em, função dos valores de reforço considerados.

Em estudos de planeamento, a informação completa sobre a adequação da rede deve contemplar índices obtidos para regime normal (caso dos estudos realizados nos Capítulos 3 e 4) e índices obtidos para situações de contingências seleccionadas. No Capítulo 5 mostra-se a partir de um conjunto de casos de estudo efectuados sobre uma rede de teste, como pode a metodologia proposta ser utilizada na avaliação de segurança em regime estacionário. Perante

os resultados obtidos são analisados alguns reforços da rede baseados, nas técnicas de melhoria da inadequação propostas no Capítulo 4. No Capítulo 5 é ainda apresentado como pode a metodologia proposta no Capítulo 3 ser integrada em estudos de fiabilidade, compreendendo apenas os componentes da rede de transporte.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões sobre o trabalho realizado. São também identificadas as vantagens e desvantagens da metodologia proposta, suas contribuições e sugeridos possíveis desenvolvimentos futuros.

ANÁLISE DA ADEQUAÇÃO DA REDE**2.1 INTRODUÇÃO**

Os estudos de adequação da rede de transporte consideram normalmente o sistema de produção. A avaliação da adequação do sistema de transporte integrando o sistema produtor tem sido designada na literatura por sistema composto e expressa na língua inglesa por *composite power system evaluation* ou *bulk power system evaluation*. Este tipo de avaliação, integrando os dois sistemas, deve-se à organização dos sectores eléctricos que tradicionalmente eram uma estrutura verticalizada onde uma mesma entidade tutelava os sistemas de produção, de transporte (e de distribuição) de energia eléctrica. Desta forma, a análise do sistema de transporte considerava sempre a análise do sistema produtor já que a mesma entidade tinha a responsabilidade de integrar os três sistemas de forma a responder às solicitações de consumo. De acordo com alguns autores [Billinton e Li, 1994; Billinton e Lallas, 1988; 1996; Billinton et al, 1993], a avaliação da adequação que se realiza para um sistema eléctrico, pode ser estruturada por níveis hierárquicos (Figura 2.1). No caso do sistema composto, o nível hierárquico a ser considerado é o HL2 (Figura 2.1).

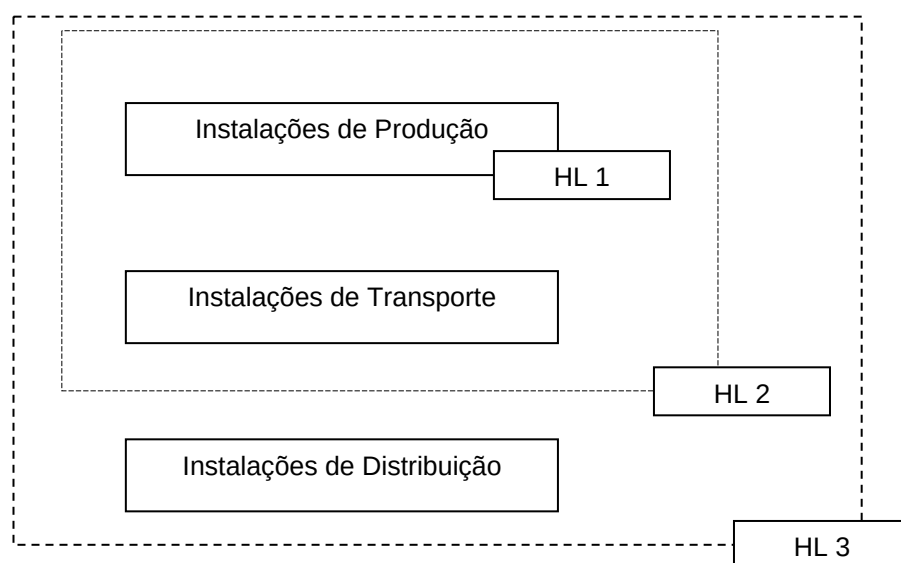


Figura 2.1 - Níveis hierárquicos de um Sistema Eléctrico de Energia, adaptado de [Billinton e Allan, 1996]

Onde:

HL1 (*Hierarchical Level 1*) – refere-se apenas às instalações de produção de energia.

HL2 (*Hierarchical Level 2*) – inclui o sistema composto de produção e transporte.

HL3 (*Hierarchical Level 3*) – inclui as três zonas funcionais na avaliação da adequação do sistema relativamente à carga pedida pelo consumidor.

Os estudos de avaliação da adequação são utilizados para planeamento da rede de transporte, existindo diversas técnicas e critérios utilizados nesta avaliação.

As primeiras técnicas e critérios utilizados no planeamento dos sistemas eléctricos foram os determinísticos. Nos critérios determinísticos e no sistema composto, o desempenho de um sistema é avaliado por diferentes cenários (congestionamento de uma linha de transporte, perda da maior unidade produtora, consideração da ponta de carga do sistema) que representam as condições de funcionamento. Estas condições podem ou não ser severas dependendo dos critérios definidos para cada cenário serem ou não satisfeitos.

Sobre os métodos determinísticos importa referir os critérios clássicos:

- Planeamento da capacidade de produção (reserva estática) – a capacidade instalada é igual à carga mais uma percentagem fixa da carga esperada, ou o sistema deve resistir à perda da unidade de maior capacidade do sistema.

- Capacidade operacional (reserva girante) – a capacidade girante é igual à carga esperada mais uma reserva igual à unidade de maior capacidade

- Planeamento da capacidade da rede – construção de um número mínimo de circuitos para um ponto de carga tal que, o sistema possa resistir à perda de um qualquer circuito. Corresponde esta situação à análise de contingências. Neste caso, a rede suporta todas as contingências simples sem ocorrência de perdas de carga ou violação das condições de funcionamento. Este é conhecido como o critério (N-1) e representa contingências simples ou de primeira ordem. São também utilizados os critérios N-2 (contingências duplas ou de segunda ordem) e os critérios N-k (contingências múltiplas onde k representa a ordem da contingência).

No sistema composto, o critério determinístico mais usual é o critério (N-1), em que o sistema deve ser capaz de resistir à saída de um qualquer componente.

Os modelos determinísticos caracterizam-se pela sua facilidade de implementação mas apresentam também desvantagens importantes. Por exemplo, não consideram as probabilidades de ocorrência das contingências, variações de produção ou variações e carga nos barramentos (incerteza).

Este aspecto levou, em primeiro lugar, ao desenvolvimento de técnicas baseadas em probabilidades, que consideram a natureza probabilística ou estocástica do comportamento do sistema. Foram assim desenvolvidas:

- Técnicas para análise de fiabilidade [Billinton, 1972];
- Trânsito de potências probabilístico [Borkowska, 1974].

Este tipo de técnicas considera modelos probabilísticos para falhas dos componentes do sistema composto e para a caracterização das produções e consumos nos barramentos.

A quantificação da adequação do sistema é realizada por meio de índices, quer se trate de análise de fiabilidade quer se trate do trânsito de potência probabilístico. A principal diferença entre as duas técnicas é que as primeiras devolvem os índices de adequação após serem solucionados os problemas da rede [Leite da Silva e Arienti, 1990] de que são exemplos as sobrecargas nos ramos ou as sub/sobre tensões. Estes problemas são geralmente resolvidos com recurso a ajustes de produção – redespacho (activa/reactiva), comutações, corte de carga, etc. Leite da Silva et al [1990] pormenorizam as diferenças entre estas duas técnicas.

Mais tarde e acompanhando a reestruturação do sector eléctrico foram também desenvolvidas técnicas para avaliação do sistema composto considerando conjuntos difusos (*fuzzy sets*). Foram igualmente desenvolvidas:

- Trânsito de potências difuso [Miranda e Matos, 1989a];
- Técnicas para análise de fiabilidade [Saraiva, 1992];

Neste tipo de técnicas é possível identificar a coexistência das duas metodologias. Por exemplo, nos casos de avaliação da fiabilidade é usual a existência de modelos probabilísticos para os componentes, e a carga/produção nos barramentos utiliza modelos baseados em conjuntos difusos, embora existam publicações com modelização difusa dos componentes [Miranda, 1998; Saraiva e Sousa, 1998]. As técnicas baseadas em conjuntos difusos

acompanharam a evolução do sector eléctrico e vieram responder à necessidade de modelizar informação com carácter não repetitivo ou estatístico. Esta situação está geralmente associada às incertezas presentes no sector eléctrico que se acentuam numa lógica de mercado. Este tipo de incerteza será estudado com maior detalhe em secção deste capítulo relativa aos trânsitos de potência difusos.

Como se referiu para os métodos determinísticos, também para os métodos probabilísticos e métodos baseados em conjuntos difusos (a que chamaremos métodos possibilísticos), um sistema (produção e transporte) é considerado adequado se conseguir satisfazer determinados critérios (como a satisfação da carga) em todos os cenários possíveis. Estes cenários correspondem à rede em regime normal (segurança N) ou regime de contingência (segurança N-k).

As contingências na análise do sistema composto, independentemente das técnicas utilizadas (determinísticas, probabilísticas ou possibilísticas), são uma parte fundamental dos processos de planeamento levados a efeito pelas entidades responsáveis pelas redes de transporte.

Classicamente, o sistema composto deverá funcionar perante todas as contingências de primeira ordem (e algumas de segunda) sem que ocorra corte de carga. Nos casos em que ocorre corte de carga poderá haver lugar a redespacho do sistema. Sendo o sistema composto constituído pelos sistemas de produção e transporte deverá este ser capaz de alimentar a carga em segurança e da forma mais económica possível. Este aspecto levou ao desenvolvimento de uma outra ferramenta que permite a avaliação de adequação que se convencionou na literatura por trânsito de potência óptimo, conhecido na literatura inglesa por *Optimal Power Flow* e designado pela sigla OPF. Este é um problema de optimização onde as funções a minimizar estão normalmente ligadas a questões económicas como a minimização dos custos de produção nos geradores, minimização das perdas ou a minimização da carga cortada, etc.

Com a evolução do sector eléctrico deu-se a separação das actividades de produção, transporte e distribuição. Sendo a actividade de produção sujeita a concorrência e actividade de transporte um monopólio, veio a necessidade de se avaliar a adequação da rede de transporte separada do sistema produtor. Também a adequação da rede de distribuição tenderá a ser avaliada de forma independente dos restantes sistemas. Esta “nova” conjuntura sugere a criação de níveis hierárquicos independentes para os sistemas de transporte e de distribuição: HL2’ e HL3’, respectivamente (Figura 2.2).

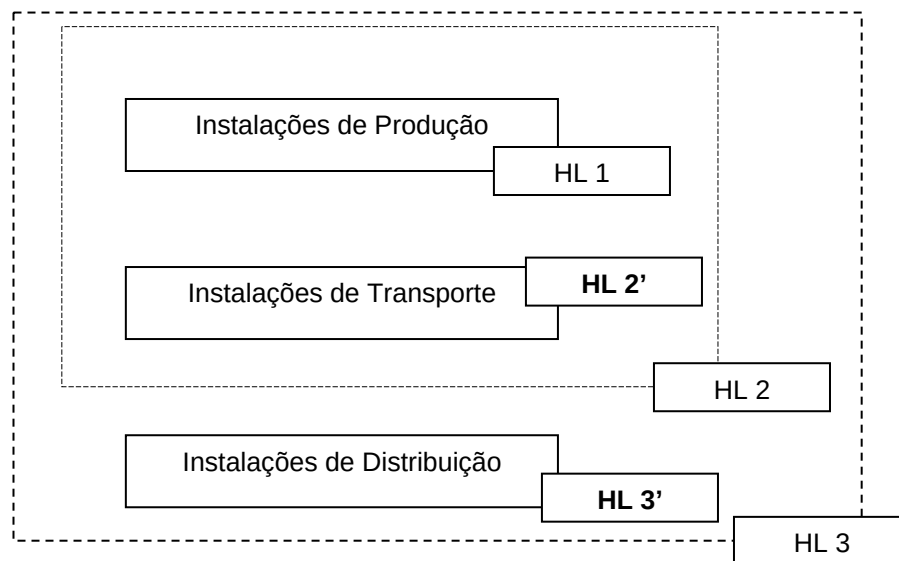


Figura 2.2 - Níveis hierárquicos de um Sistema Eléctrico de Energia, adaptado de [Billinton e Allan, 1996]

A finalidade deste trabalho foi contribuir com uma ferramenta capaz de auxiliar o planeamento dos sistemas eléctricos de energia, em particular da rede de transporte de energia eléctrica. Na satisfação deste objectivo é apresentada no Capítulo 3 uma nova metodologia, capaz de avaliar a adequação da rede de forma independente do sistema produtor fora da ideia clássica do sistema composto. A avaliação realizada refere-se à capacidade de transporte de electricidade para satisfação de pedidos de transporte de electricidade mantendo o tipo de avaliações feitas em estudos de planeamento (regime normal e de contingência).

Este capítulo pretende rever um conjunto de processos e técnicas associados ao planeamento clássico das redes e está estruturado da seguinte forma: dado o conjunto de incertezas a considerar no processo de planeamento que justificaram a existência de técnicas probabilísticas e difusas é em primeiro lugar descrita a evolução do sector eléctrico. Em seguida analisa-se a forma tradicional de realizar o planeamento do sistema composto identificando-se contingências e formas de medir a sua severidade. Numa outra secção é descrita a evolução registada nas ferramentas utilizadas para avaliação da adequação de um dado estado do sistema a partir de trânsitos de potência (desde os métodos determinísticos aos métodos possibilísticos). São estudadas as metodologias existentes e identificados os problemas clássicos destas formulações. Sendo a metodologia proposta para adequação da rede de transporte (Capítulo 3) baseada em trânsitos de potência (TP), concretamente em métodos possibilísticos, importa referir que será conferido especial ênfase aos trânsitos de

potência possibilísticos. Segue-se a descrição sucinta dos trânsitos de potência óptimos. Dada a importância da fiabilidade aplicada ao sistema composto é feita uma breve referência às principais técnicas de análise de fiabilidade numa secção a seguir sendo as principais aplicações comerciais descritas no Anexo A. Dado que a avaliação da adequação por TP (ou fiabilidade) considera a análise de estados, são delineadas numa secção própria, as metodologias clássicas para a selecção de estados. O capítulo encerra com as conclusões.

2.2 REESTRUTURAÇÃO DO SECTOR ELÉCTRICO

Tradicionalmente, o sector eléctrico assentava numa estrutura verticalizada dividida em zonas funcionais [Billinton e Allan, 1996]. Estas zonas compreendiam as instalações de produção, transporte e distribuição e eram tuteladas por uma única entidade. Com o primeiro choque petrolífero, na década de 70 este modelo organizacional, em que uma entidade detinha o controlo de todas as zonas funcionais, foi pela primeira vez transformado.

No Chile [Raineri e Rudnick, 1997; Pollitt, 2004], as reformas do sector começaram em 1978 com a criação da Comissão Nacional de Energia (CNE). Com a separação das actividades de produção, transporte e distribuição verificou-se uma privatização considerável dessas actividades. Esta reforma foi efectivada com a promulgação de uma nova lei para a electricidade em 1982 (*Ley General de Servicios Eléctricos*). O sistema eléctrico ficou na posse de investidores privados cabendo ao estado uma função reguladora, fiscalizadora e subsidiária.

Também na década de 70 surge nos EUA, a figura do produtor independente de electricidade (PI) a par da obrigação de compra da energia eléctrica produzida pelas entidades monopolistas. Também na Europa, em 1983 no Reino Unido surgiu a figura do PI e a mesma obrigação de compra. O sector eléctrico público era constituído por empresas de distribuição denominadas por *Area Boards* cuja actividade era coordenada por uma entidade central (*Central Electricity Generating Board*). É introduzido o princípio da concorrência nos subsistemas da produção e de distribuição e criada uma entidade independente para gerir o transporte de energia eléctrica (*National Grid Company*). Em 1990 é criado um mercado grossista (*pool*). Nos EUA a reestruturação do sector eléctrico continua e em 1992 é ordenado às entidades concessionárias a inclusão de medidas de conservação de energia e gestão da procura. Na Noruega, a reestruturação é iniciada em 1990. Em 1992 também a Suécia inicia a sua reestruturação unindo-se à estrutura eléctrica norueguesa em 1996. Neste ano é constituída a *NordPool* formada por estes dois países, posteriormente alargada à Finlândia e Dinamarca. Na Espanha o processo de desregulamentação do sector eléctrico começa em 1997 com a publicação da Lei 54/1997. O mercado de energia eléctrica é organizado num mercado diário/intra-diário e entra em funcionamento em 1998 incluindo contratos bilaterais físicos [ERSE, 1998]. Em Portugal, o processo de reestruturação do sector eléctrico começa com as condições favoráveis criadas pelo DL n.º. 189/88, de 27 de Maio, relativo à produção independente usando fontes renováveis ou de cogeração estando a EDP (Electricidade de

Portugal) obrigada a comprar a energia produzida. Em 1995 é publicado um pacote legislativo (DL 182/95 a DL 188/95) que estabelece um novo modelo organizacional. O Sistema Eléctrico Nacional (SEN) passava a assentar na coexistência de um Sistema Eléctrico de Serviço Público (SEP) e de um Sistema Eléctrico Independente (SEI) regulado por uma entidade independente, a ERSE [1999], na época denominada Entidade Reguladora do Sector Eléctrico. As competências da ERSE incluíam entre outras, a criação de regulamentos (acesso às redes, tarifário, etc) e fixação das tarifas. A EDP é reestruturada sendo separadas juridicamente as actividades de produção, transporte e distribuição de energia eléctrica. Tal como sucede no resto da Europa à generalidade das companhias monopolistas, também a EDP é privatizada. A gestão das instalações de transporte fica concessionada a uma única entidade que detém o monopólio, a REN (Rede Eléctrica Nacional, SA). A REN, além da responsabilidade pelo transporte de electricidade, detém ainda outras competências: gestão do sistema e comprador de energia para o SEP.

Com vista a harmonizar o sector, a 19 de Dezembro de 1996 o Parlamento Europeu e o Conselho Europeu estabelecem as regras comuns para o mercado interno de electricidade (Directiva 96/92/CE). Entre outras finalidades é estabelecido (Artigo 19) que os Estados Membros tomarão as medidas necessárias para assegurar a abertura dos seus mercados de electricidade. Na maior parte dos países da União Europeia verificou-se a evolução gradual do sector eléctrico no sentido de uma maior abertura e concorrência. Em 2001, com a finalidade de promover a aceleração do mercado de electricidade (liberalização total do mercado grossista e retalhista), a Comissão Europeia apresentou uma proposta de alteração da Directiva 96/92/CE que veio a ser concretizada em 2003 com a Directiva 2003/54/CE. Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 29/2006 de 15 de Fevereiro inicia a transposição para a ordem jurídica interna dos princípios da Directiva n.º 2003/54/CE. Este Decreto estabelece os princípios gerais relativos à organização e funcionamento do SEN, à organização dos mercados de electricidade e ao exercício das actividades de produção, transporte, distribuição e comercialização de energia eléctrica.

Em síntese, as alterações no âmbito da desregulamentação do sector eléctrico consistem na mudança da estrutura verticalizada e monopolista tradicional para uma situação onde há concorrência na produção e na comercialização (ao nível da distribuição), mantendo-se apenas os monopólios naturais associados à gestão técnica do sistema e das redes de transporte. Nesta estrutura, as companhias de produção (*GENCO – Generation Companies*) não são controladas pela mesma entidade que gere o sector do transporte e podem competir

entre si para vender a sua energia aos clientes (cliente final, cooperativas, comercializadores, bolsa). As companhias de transporte (*TRANSCO – Transmission Companies*) têm por objectivo o transporte de energia eléctrica ao longo das linhas de Alta Tensão que tutelam não estando esta actividade sujeita a concorrência. Em Portugal a TRANSCO é a REN sendo o transporte assegurado nas linhas de 400 kV até 130 kV. As companhias de distribuição (*DISCO – Distribution Companies*) recebem energia dos pontos de entrega da rede de transporte e colocam-na nos pontos de carga. Os comercializadores, mediante atribuição de licença podem comprar livremente energia por grosso e vende-la a retalho. Para desenvolverem esta actividade têm o direito de acesso às redes de transporte e de distribuição de electricidade (mediante o pagamento de tarifas reguladas). Finalmente, os consumidores podem escolher livremente o seu comercializador sendo titulares do direito de acesso às redes. Em Portugal a mudança de comercializador (fornecedor) não é onerada do ponto de vista contratual.

Existe uma colaboração estreita entre todas as entidades envolvidas com vista ao fornecimento do produto electricidade a determinado custo e fiabilidade [Billinton e Sheblé, 2000].

A evolução do sector em Portugal acompanhou esta tendência, até ao ponto da criação do Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL). O MIBEL representa o segundo mercado transnacional Europeu a seguir à *Nordpool*, sendo centrado numa bolsa gerida pelo Operador de Mercado Ibérico (OMI) que apresenta dois pólos: um em Portugal (OMIP) para o mercado a prazo, o outro em Espanha (OMEL) para o mercado diário/intra diário.

A reestruturação do sector afectou a forma de planear os sistemas eléctricos, nomeadamente:

- Descentralização das actividades de produção, transporte e distribuição.
- Aumento da incerteza no processo de planeamento em consequência do maior número de agentes envolvidos;
- Possibilidade de escolha livre, por parte dos consumidores, do fornecedor de energia;
- Produção baseada em regras de mercado;

2.2.1 Marcos para a incerteza em Portugal

Em Portugal podem ser enumerados os seguintes marcos para a incerteza:

1988) DL n.º. 189/88 de 27 de Maio, relativo à produção independente. A partir deste momento, além de se preocupar com a elaboração de previsões para a evolução dos consumos (tendo em conta avarias, manutenções, etc, das centrais), a entidade responsável por todo o sistema eléctrico passa a contar com a incerteza da PI. Por exemplo, aproveitamentos hidroeléctricos e eólicos além de questões associadas à fiabilidade das máquinas de produção tinham também de considerar incerteza associada à disponibilidade do recurso primário. No caso de centrais de cogeração, as variações nos preços dos combustíveis poderiam resultar em oscilações de produção. Estas questões conduziram à necessidade de modelizar a informação destes tipos de aproveitamentos, surgindo um vasto número de publicações, por exemplo [Ponce de Leão e Matos, 1998; Sayas, 1996; Milligan 2001a; 2001b; Gouveia, 2002; Gouveia e Matos, 2004, 2008b; Manguiera et al 2007];

1995) A partir deste ano [ERSE, 1998], também os consumidores com consumos de energia anuais superiores a 100 GWh por local de consumo podiam optar livremente por outro fornecedor de energia eléctrica que não o Sistema Eléctrico de Serviço Público (SEP). A entidade responsável pelo planeamento, além da incerteza na produção teria também agora de considerar maior incerteza nos consumos.

1996) Directiva 96/92/CE – abertura dos mercados de electricidade. Aumenta progressivamente o número de clientes que podem escolher livremente o seu fornecedor de electricidade.

2003) Directiva 2003/54/EC – liberalização total do mercado grossista e retalhista.

Em consequência de todas estas transformações a incerteza a considerar nos estudos de TP aumenta o que leva ao desenvolvimento de ferramentas capazes de considerar as incertezas. São defendidos modelos para análise de adequação das redes baseados na teoria das probabilidades e na teoria dos conjuntos difusos (*fuzzy sets*).

2.3 ELEMENTOS DO PLANEAMENTO CLÁSSICO DA REDE DE TRANSPORTE

O planeamento da rede de transporte pode ser realizado sob duas formas: análise estacionária que compreende estudos de médio ou longo prazo (construção de reforços/novas estruturas sobre a rede existente em datas predefinidas) ou análise dinâmica que se refere a estudos de curto prazo e onde é analisada resposta do sistema (estabilidade em regime transitório) a perturbações. Neste trabalho a avaliação da adequação da rede refere-se ao regime estacionário sendo as revisões da literatura direccionadas neste sentido.

Classicamente, o planeamento da rede de transporte é realizado considerando a integração do sistema produtor (HL2). Em Portugal, a empresa responsável pela rede de transporte está obrigada ao planeamento, construção, operação e manutenção da Rede Nacional de Transporte (RNT) de energia eléctrica. A construção de novos elementos ou o reforço dos existentes é normalmente planeada com base em critérios técnicos como as tensões e intensidades de corrente considerando: regime normal e regimes de contingência.

O regime normal corresponde à situação em que todos os elementos da rede se encontram em serviço (ausência de contingências).

As contingências correspondem a perturbações de carácter imprevisível que podem originar problemas graves ao nível da segurança do sistema. Devido às consequências das contingências (e também motivadas por razões de qualidade de serviço), as concessionárias das redes de transporte desenvolvem processos de análise e reacção a incidentes. Desta forma, os operadores das redes planeiam os sistemas eléctricos minimizando antecipadamente as consequências das perturbações.

A avaliação da adequação da rede (perspectiva do sistema composto) integra estudos de contingência e obedece geralmente à sequência seguinte [Billinton e Allan, 1988]:

- a) Avaliar a adequação do sistema com todos os componentes em serviço (caso base, regime normal);
- b) Estudar alterações na configuração da rede por simulação de saídas forçadas de serviço de equipamentos (linhas, transformadores, etc);
- c) Calcular a adequação do sistema modificado;
- d) Considerar acções correctivas como redespacho das unidades de produção, cortes de carga, reforço de ramos, etc;

e) Calcular os índices globais e locais (nos pontos de carga) de adequação do sistema

Para se tratar o ponto b) deverá ser definida uma política de contingências para a rede [ERSE 2008]. Em Portugal, a REN utiliza nos seus estudos de planeamento as seguintes configurações topológicas [REN, 2005a]:

Critério N (todos os elementos da rede em serviço)

Critério N-1 (falha de um qualquer elemento da rede nacional de transporte, RNT): linha, transformador, bateria de condensadores, etc.

Critério N-2 (falha simultânea de dois elementos da RNT). Este regime de contingência (N-2) não é aplicado a toda a rede como acontece com regime de contingência N-1.

A REN nos estudos de planeamento que executa, apenas avalia as situações mais severas (*Critério N-2*) de contingência que no caso da RNT são as seguintes (Tabela 2.1):

Tabela 2.1 – Falhas mais severas consideradas na RNT pela sua concessionária [REN, 2005a]

Tipo de falha	Aplicação
Falha simultânea de 2 circuitos no mesmo apoio (critério N-2)	Linhas duplas que coloquem em causa o abastecimento de grandes centros do consumo de Lisboa e Porto Qualquer linha dupla com comprimento superior a 35 km
Falha de dois elementos quaisquer, não simultânea com possibilidade de redespacho da produção e reconfiguração da rede (critério N-1-1)	Em qualquer ponto da rede de 400 kV Nos auto-transformadores inseridos nos pontos com função de transporte (ligados nos 400 kV)

Para o sistema ser considerado adequado:

- As tensões e intensidades de corrente deverão respeitar, respectivamente, os valores de aceitabilidade das tensões nos barramentos e as cargas máximas admissíveis nos ramos em regime normal, contingência de primeira ordem ou para as contingências de segunda ordem previstas;
- Em nenhum dos casos anteriores as simulações efectuadas deverão conduzir a resultados de corte de carga;
- Em casos muito severos, como a saída simultânea de dois elementos de serviço (contingências de segunda ordem) é admitido o recurso a redespacho da produção e reconfigurações topológicas da rede.

As situações de contingência que podem surgir na rede de transporte são classificadas na literatura como “incidentes” [Almeida et al, 2005]:

“O incidente é um acontecimento que origina a desconexão (não programada) de um ou mais elementos da rede – elementos do incidente, podendo originar uma interrupção de serviço.”

As causas dos incidentes podem ser devidas a factores atmosféricos [Billinton e Li, 1994] como descargas atmosféricas que causam saídas de serviço em vários pontos da rede, por erro humano (manobras de equipamento, etc.), por falhas do equipamento da RT (disparo intempestivo de disjuntores por acção defeituosa de um relé, etc.) por incêndios (levando ao corte de determinados troços da rede podendo ter como sequência a sobrecarga de outros e respectiva actuação da protecção) ou devido a outro tipo de causas (avifauna, árvores, etc).

Na literatura pode ser encontrado um conjunto vasto de publicações sobre metodologias de selecção e análise de contingências, por exemplo [Ejebe e Wollenberg, 1979; Mikolinnas e Wollenberg, 1981; Billinton e Li, 1994, Allan e Billinton, 2000, Billinton e Mo, 2004]. Devido à dimensão dos sistemas eléctricos de energia e interligações com outros sistemas, não são consideradas todas as situações de contingência (ex.: RNT – Tabela 2.1). Este aspecto tem levado investigadores a colocar questões relativas aos processos de selecção das contingências temendo que as situações mais severas para o sistema possam não estar a ser consideradas [Wood e Wollenberg, 1996]. Coloca-se assim a questão da *severidade da contingência*. Em geral, uma contingência é considerada severa para o operador da rede, se mesmo após redespacho da produção se verifica situação de corte de carga.

A análise de contingências conduz à obtenção de índices de severidade. Estes índices dividem-se em índices individuais e índices compostos [Agreira et al, 2007]. Os índices de severidade individuais são utilizados para avaliar o impacto das sobrecargas nos ramos e das violações dos limites de tensão nos barramentos. As expressões (2.1) e (2.2) permitem calcular os índices relativos à potência e à tensão, respectivamente:

$$\varepsilon_p = \sum_{i=1}^{n_{\text{ramos}}} \sigma_{pj} \left(\frac{P_j}{P_j^{\text{máx}}} \right)^{2m} \quad (2.1)$$

Onde:

ε_p – índice de severidade para a potência no ramo j

σ_{pj} – peso para a potência activa no ramo j

P_j – potência activa no ramo j

$P_j^{\text{máx}}$ – limite à capacidade de transporte em potência activa no ramo j

m – expoente a especificar

n_{ramos} – números de ramos do sistema.

$$\varepsilon_v = \sum_{i=1}^{n_{\text{barras}}} \sigma_{vj} \left(\frac{V_i - V_i^{\text{sp}}}{\Delta V_i^{\text{lim}}} \right)^{2m} \quad (2.2)$$

Onde

ε_v – índice de severidade para a tensão no barramento i

σ_{vj} – peso para a para a tensão no barramento i

V_i – módulo da tensão no barramento i

V_i^{sp} – tensão especificada para o barramento i

ΔV_i^{lim} – desvio máximo da tensão permitido no barramento i

n_{barras} – número de barramentos do sistema

Os factores de peso em (2.1) e (2.2) consideram a importância dos diferentes componentes para o sistema e reflectem o impacto das violações de potência e tensão nas condições de funcionamento do sistema. Estes “pesos” são determinados com base na experiência do operador. Os índices de severidade referidos sofreram evoluções de forma a integrar as perdas do sistema. Este estudo foi conduzido por Caglar e Ozdemir [1999] e as expressões para os índices têm uma componente que é função das perdas activas do sistema.

Os índices compostos podem ser obtidos atribuindo diferentes pesos aos índices individuais, adicionando depois todas as parcelas. Mais pormenores poderão ser encontrados em Agreira et al [2007] que propõe uma nova forma de atribuir pesos aos índices individuais.

O planeamento das redes considera geralmente o uso de critérios determinísticos onde a adequação do sistema é medida pela sua capacidade na satisfação da carga, podendo envolver situação de redespacho, etc. Estes critérios apesar de fáceis de implementar, não consideram incerteza nas grandezas envolvidas, como variações de produção, carga ou a indisponibilidade (probabilidade de saída de serviço dos componentes). Para contemplar estas variações foram definidos critérios probabilísticos que, classicamente são também utilizados pelas entidades responsáveis pelas redes, para efeitos de planeamento. Estes critérios, que se integram em análise de fiabilidade são tratados mais adiante na secção 2.5.

2.4 METODOLOGIAS CLÁSSICAS PARA TRÂNSITOS DE POTÊNCIA (TP)

Os métodos de trânsito de potência (*power flow*) são importantes ferramentas no planeamento e operação dos sistemas eléctricos de energia (SEE) permitindo a avaliação de estados correspondentes a regimes normais ou de contingência. Tais métodos fornecem a solução para o regime estacionário do sistema eléctrico, compreendendo a rede (linhas, transformadores, baterias de condensadores, etc), os geradores e as cargas. As equações que definem o problema são resolvidas a partir de métodos numéricos utilizando meios computacionais, dada a dimensão dos sistemas a planear. A solução numérica do problema corresponde às amplitudes e argumentos de tensões em todos os barramentos, trânsitos de potência entre os ramos e perdas.

As primeiras aplicações de trânsito de potências surgiram na década de 50 [Ward e Hale, 1956] tendo sido a utilização do método de Newton-Raphson [Tinney e Hart, 1967] a par do desenvolvimento de técnicas de manuseamento de matrizes esparsas que se revelou mais eficiente permitindo diminuir os tempos de simulação associados ao problema. Estas aplicações têm sido amplamente utilizadas desde então no planeamento da expansão dos SEE. A metodologia mais utilizada corresponde aos métodos determinísticos, onde o analista define os dados de entrada (que são valores exactos para o problema) considerando um determinado perfil de carga e produção do SEE. Dado que existe incerteza na escolha destes valores pelo analista devido a diversos factores, foram introduzidos ao longo dos anos novos modelos capazes de integrar a incerteza.

O primeiro conjunto desses modelos [Borkowska, 1974] considera a produção e a carga modelizada com recurso a distribuições de probabilidade, sendo denominado na literatura por trânsito de potência probabilístico. Os resultados do problema (argumentos das tensões, trânsitos de potência, etc) são também distribuições de probabilidade. Esta metodologia foi integrada em estudos de fiabilidade considerando a modelização de componentes, cargas/produção por técnicas probabilísticas. Billinton e Allan [1988] descrevem pormenorizadamente a aplicação de técnicas probabilísticas aplicadas na avaliação da fiabilidade do sistema composto. O assunto da fiabilidade será tratado mais adiante neste capítulo.

O segundo conjunto de modelos considerando incerteza, designa-se por trânsito de potência difuso [Miranda e Matos, 1989a]. Neste modelo, as variáveis de entrada do problema são modelizadas por recurso a distribuições de possibilidade e os resultados do problema são também distribuições de possibilidade. Também neste caso foram desenvolvidos modelos para análise de fiabilidade considerando modelização difusa de componentes e cargas/produção ou modelização probabilística de componentes e modelização difusa de carga/produção.

Os trânsitos de potência determinísticos, probabilísticos e difusos, são normalmente designados na literatura inglesa, respectivamente por *Deterministic Power Flow - DPF*, *Probabilistic Power Flow – PPF* e *Fuzzy Power Flow – FPF*.

Nas secções seguintes, serão referidos estes modelos sendo dada especial relevância aos modelos de FPF que definem o âmbito de aplicação deste trabalho. Serão igualmente referidas contribuições dadas ao longo dos anos relativas aos modelos de FPF.

2.4.1 Modelos determinísticos de TP

Num estudo de TP determinístico, as quantidades conhecidas são a potência activa injectada (P_i) em todos os barramentos (PQ e PV) com excepção do barramento de compensação, as potências reactivas injectadas para todas as cargas (PQ) e a amplitude da tensão em todos os geradores. Ou seja, os dados iniciais do problema correspondem às variáveis especificadas e podem ser enunciados pelo conjunto de equações seguinte:

$$P_i = g(V_i, \theta_i) \quad (2.3)$$

$$Q_i = h(V_i, \theta_i) \quad (2.4)$$

Onde:

$i = 1, \dots, n$ barramentos

P_i e Q_i são a potência activa e potência reactiva injectada no barramento i

V_i e θ_i são a amplitude e o ângulo da tensão no barramento i .

As equações que exprimem no problema o equilíbrio de potência activa e reactiva em coordenadas polares são dadas por:

$$P_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (2.5)$$

$$Q_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (2.6)$$

onde:

G_{ik} e B_{ik} são os elementos da parte real e imaginária da matriz das admitâncias nodais ($Y=G+jB$).

O problema consiste assim no cálculo dos desvios de potência, correspondendo (2.7) aos barramentos PV e PQ e (2.8) e para os barramentos PQ:

$$\Delta P_i = P_i^{sp} - P_i^{calc} = P_i^{sp} - \sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (2.7)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{sp} - Q_i^{calc} = Q_i^{sp} - \sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (2.8)$$

onde *sp* e *calc* representam, respectivamente, as potências especificadas e as potências calculadas em cada iteração. Na solução óptima do problema do problema, (2.7) e (2.8) corresponderão a um desvio nulo.

A primeira etapa da resolução consiste no cálculo das tensões nos barramentos. Esta é a etapa mais demorada, pois as equações inerentes aos barramentos são não lineares o que obriga à utilização de um processo iterativo. São conhecidos três métodos que podem ser utilizados na resolução desta etapa [Stott, 1974]:

- *Método de Gauss-Seidel* [Ward e Hale, 1956; Glimn e Stagg, 1957] formulado para a matriz Y e para a matriz Z;
- *Método de Newton-Raphson* [Tinney e Hart, 1967];
- *Método Rápido de Desacoplamento* [Stott e Alsac, 1972; 1974].

Em qualquer destes métodos é realizada uma estimativa para o valor inicial das amplitudes de argumentos das tensões para a primeira iteração. O processo repete-se até que se obtenha uma solução óptima ou próxima do óptimo que é função de critérios de convergência definidos. Os critérios utilizados correspondem a (2.9) e (2.10) sendo normalmente aceite que $C1=C2=C$. Tipicamente os valores (C) considerados para grandes sistemas são 1MW/Mvar.

$$|\Delta P_i| \leq C1 \quad (2.9)$$

$$|\Delta Q_i| \leq C2 \quad (2.10)$$

Dos métodos referidos o que apresenta uma convergência mais lenta é o Gauss-Seidel, pelo que as outras metodologias, nomeadamente o Newton-Raphson, são preferencialmente aplicadas há mais de três décadas.

A segunda etapa da solução do problema de TP permite obter a potência injectada no barramento de compensação em função dos valores das amplitudes e argumentos (2.5 – 2.6) das tensões. Finalmente, a terceira etapa permite o cálculo dos trânsitos de potência nos ramos (2.11 – 2.12).

$$P_{ik} = \frac{R_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} \left(R_{ik} \cdot V_i^2 - R_{ik} V_i V_k \cos \theta_{ik} - X_{ik} V_i V_k \sin \theta_{ik} \right) \quad (2.11)$$

$$Q_{ik} = \frac{R_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} \left(X_{ik} \cdot V_i^2 - X_{ik} V_i V_k \cos \theta_{ik} - R_{ik} V_i V_k \sin \theta_{ik} \right) - \frac{B}{2} V_k^2 \quad (2.12)$$

onde R_{ik} , X_{ik} , e B , representam respectivamente a resistência, a reactância e o contributo da admitância shunt da linha i-k.

Generalizando, o problema determinístico de TP pode ser descrito matematicamente pelo conjunto de equações:

$$Y = g(X) \quad (2.13)$$

$$Z = h(X) \quad (2.14)$$

Onde:

Y representa o vector das variáveis de entrada do problema. Estas são as variáveis especificadas para o sistema e correspondem à potência activa e potência reactiva injectadas nos barramentos PQ, às amplitudes das tensões e potências activas injectadas nos barramentos PV.

X representa o vector das variáveis de estado do problema. Estas variáveis são incógnitas e correspondem às amplitudes e argumentos das tensões nos barramentos PQ, aos argumentos das tensões e potências reactivas geradas nos barramentos PV

Z corresponde ao vector das variáveis de saída do problema, ou seja trânsitos de potência activa e reactiva nos ramos do SEE.

Como é conhecido, X não se pode exprimir directamente em função de Y , pelo que a solução de (2.13) terá de ser encontrada por um processo iterativo. Este ponto corresponde à primeira etapa referida anteriormente. Sendo obtida a solução para as variáveis de estado (X), a solução para (2.14) é imediata já que bastará substituir os valores obtidos em (2.11) e (2.12).

Num problema determinístico, em cada interacção é calculado o erro associado derivado das estimativas que foram realizadas inicialmente para as tensões nos barramentos. Sendo a solução obtida X' , as diferenças calculam-se de acordo com (2.15). Esta expressão mais não é que a generalização das expressões (2.7) e (2.8), correspondendo ao cálculo dos erros entre os valores especificados e calculados das potências activa e reactiva injectadas.

$$\Delta Y = Y' - Y = g(X') - g(X) \quad (2.15)$$

Se for utilizado o método de Newton-Raphson, a expressão (2.13) é linearizada até X' e a actualização (nova solução) é realizada de acordo com (2.16). O processo repete-se até que (2.9-2.10) apresentem um valor nulo ou fiquem abaixo de um valor predefinido.

$$\Delta X = J^{-1} \cdot \Delta Y \quad (2.16)$$

onde ΔX corresponde ao desvio entre a solução inicial e a nova solução com J^{-1} (inverso do Jacobiano utilizado no Newton-Raphson) avaliado em X' . O processo iterativo continuará após actualização dos valores das amplitudes e argumentos das tensões, sendo o novo ponto de partida para a iteração seguinte (X'') dado por (2.17):

$$X'' = \Delta X + X' \quad (2.17)$$

Quando o critério de convergência for encontrado, terão início as etapas 2 e 3 referidas anteriormente, ou seja será obtida a solução de (2.14). Até se atingir o critério de convergência e partindo de uma solução inicial serão realizadas tantas linearizações da função original quanto o número de iterações utilizadas.

Em redes de grande dimensão onde se deseja a obtenção dos fluxos de potência activa de forma mais rápida que a correspondente ao uso de modelo AC, em função de algumas simplificações (como desprezar a parte resistiva das linhas) utiliza-se o modelo linearizado, conhecido por modelo DC.

As equações básicas de um TP determinístico, modelo DC, são dadas por (2.18) e relacionam os argumentos da tensão nos barramentos com a suas potências activas injectadas

$$[P] = [B][\theta] \quad (2.18)$$

$$B_{ii} = \sum_{k \neq i} \frac{1}{X_{ik}} \quad B_{ik} = -\frac{1}{X_{ik}}$$

onde :

P = vector das potências injectadas;

θ = vector dos ângulos das tensões;

X_{ik} = reactância do ramo entre os barramentos i e k.

Uma vez que o determinante de B é nulo, o sistema de equações é indeterminado. Fixando a origem das fases e eliminando uma equação (geralmente a correspondente ao barramento de referência), obtém-se um sistema de equações resolúvel (2.19).

A potência activa gerada no barramento de referência vem igual à diferença entre as potências produzidas em outros barramentos e as potências consumidas no SEE. O vector do argumento das tensões e o vector do fluxo de carga entre a barra i e a barra j são calculados, respectivamente por (2.20) e (2.21).

$$[\hat{P}] = [\hat{B}][\hat{\theta}] \quad (2.19)$$

$$[\hat{\theta}] = [\hat{P}][\hat{B}]^{-1} \quad (2.20)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{X_{ij}} (\theta_i - \theta_j) \quad (2.21)$$

onde

P_{ij} = trânsito de potência entre o barramento i e o barramento j;

X_{ij} = reactância entre o barramento i e o barramento j;

Os módulos das tensões são supostos iguais a 1 pu e o trânsito de potência reactiva é desprezado. Também é possível obter directamente o trânsito de potências P_{ij} (sem calcular as fases das tensões), com recurso à matriz de sensibilidades (A) que se define em (2.22) onde $A_{k,j}$ relaciona a potência injectada na linha k com a potência injectada no barramento j.

$$A_{k,j} = \frac{Z_{ij} - K_{kj}}{x_{ij}} \quad (2.22)$$

$$[Z_{ij}] = [B_{ij}]^{-1}$$

Na posse de todos os coeficientes de A , o trânsito de potência activa em cada ramo é em seguida determinado por (2.23):

$$[P_L] = [A][P] \quad (2.23)$$

onde P_L corresponde ao vector dos trânsitos de potência nos ramos e P corresponde ao vector das potências injectadas.

Conforme o modelo utilizado (DC ou AC), as variáveis de saída do problema serão diferentes:

- Modelo DC: trânsitos de potência activa nos ramos, fase da tensão nos barramentos do SEE, potência activa produzida no barramento de referência;
- Modelo AC: trânsitos de potência activa e trânsitos de potência reactiva nos ramos, potências reactivas geradas nos barramentos PV e no barramento de referência, fase das tensões nos barramentos PQ e PV, amplitude das tensões nos barramentos PQ, potência activa gerada no barramento de referência, perdas de potência activa e perdas de potência reactiva nos ramos do SEE.

Embora não seja objectivo desta dissertação desenvolver este tópico, devem mencionar-se as evoluções que os trânsitos de potência determinísticos têm sofrido. Assim, nomeadamente na versão AC e relacionadas com a questão associada aos tempos de simulação, pode referir-se a utilização de algoritmos de processamento paralelo [Wallach e Conrad, 1976]. São também conhecidas aplicações como os algoritmos genéticos [Wong e Li, 1996] ou a programação orientada por objectos [Neyer e Wu, 1990]. Vários autores têm também proposto [Ganesan et al, 1972; Klump e Overbye, 2000] ao longo dos anos técnicas com vista a melhorar a convergência do Newton-Raphson aplicado ao trânsito de potências.

Sobre a designação de modelo “determinístico” interessa referir que estes modelos são designados desta forma por não considerarem directamente incerteza nos dados de entrada (2.13) do SEE. De facto, o estado do sistema corresponde a uma “fotografia” tirada no tempo, ou e o que é mais vulgar, a um conjunto de valores determinísticos fornecidos por um especialista. Como as variáveis de entrada estão naturalmente sujeitas a incerteza (variações de carga ou variações de produção), o analista em causa tem de fazer um grande número de

escolhas e em consequência executar um igualmente grande conjunto de problemas de trânsito de potências se quiser considerar alguns cenários. Por exemplo, se for considerado um conjunto (Z) de valores de carga para cada barramento (sendo NB o número total de barramentos do SEE), terá de ser executado um número de trânsitos de potência igual ao número de combinações de carga dos barramentos (Z^{NB}). Se forem considerados vários cenários (n) de expansão do SEE com vários conjuntos Z distintos ($Z_1, Z_2, \dots, Z_n$), o problema verá aumentada muito a sua dimensão.

A necessidade de capturar incerteza em estudos de trânsito de potências levou os analistas a definir novas metodologias. Matematicamente existem dois tipos principais de formulações considerando incerteza: os Trânsitos de Potência Probabilísticos e os Trânsitos de Potência Difusos (ou possibilísticos). Estas duas formulações serão enunciadas nas secções seguintes.

2.4.2 Modelos probabilísticos de TP

A constatação de que a incerteza da carga influencia os resultados e conclusões do exercício dos TP levou em 1974, Borkowska [1974] a propor um algoritmo baseado no modelo DC que permite a integração/definição de distribuições de probabilidade discretas e normais (contínuas) como potências especificadas. A informação relativa a cada barramento passa a ser definida por um conjunto de valores onde cada valor tem associada uma determinada probabilidade. O conjunto de valores que define cada produção ou carga em cada barramento corresponde ao somatório de todas as probabilidades, a unidade. O tipo de variáveis, associando um valor numérico a um acontecimento aleatório e que caracterizam neste caso a informação relativa aos barramentos é conhecido por *variáveis aleatórias*. Uma variável aleatória W é uma função que faz corresponder um valor numérico ao resultado individual de uma experiência aleatória. Existem *variáveis aleatórias discretas* (o conjunto de valores possíveis de W é finito ou infinito numerável) e *variáveis aleatórias contínuas* (se o conjunto de valores possíveis de W for inumerável).

As variáveis aleatórias discretas ficam completamente definidas por uma das funções seguintes:

Função de probabilidade

$$f(w) = P(W = w) \text{ para todo o } w \text{ possível}$$

Função de distribuição

$F(w) = \sum_{w_i \leq w} f(w_i)$ que representa a probabilidade acumulada até w .

As variáveis contínuas são normalmente definidas por *funções densidade probabilidade (fdp)*. Uma variável aleatória contínua tem densidade $f(w)$ se f é uma função não negativa tal que a probabilidade no intervalo $[c,d]$ é dada por:

$$\int_c^d f(w)dw$$

Numa variável contínua para todo o w , a *função de distribuição* acumulada vem:

$$F(w) = \int_{-\infty}^w f(w)dw$$

Outra informação existente na estatística e que serve os TP probabilísticos refere-se aos parâmetros das variáveis: o valor esperado $E[W]$ (ou valor médio da distribuição) o desvio padrão e a variância (medida da dispersão da distribuição).

$$E(W) = \mu = \sum [w \cdot f(w)] \quad (2.24)$$

$$\sigma^2 = \sum [(w - \mu)^2 \cdot f(w)] \quad (2.25)$$

$$\sigma = \sum [(w - \mu)^2 \cdot f(w)] \quad (2.26)$$

Distribuições de probabilidade utilizadas para cargas e geração

Existem vários tipos de distribuições de probabilidade sendo as mais utilizadas as distribuições normais e as distribuições binomiais [Allan et al, 1974; Allan e Al-Shakarchi, 1976; Leite da Silva et al, 1990].

As distribuições normais são usualmente utilizadas para modelização das cargas nos barramentos. Neste caso, o valor central representa o valor médio da potência consumida e o desvio padrão a variação relativamente a esse valor. Uma distribuição normal tem por domínio o conjunto de todos os números reais $]-\infty, \infty[$.

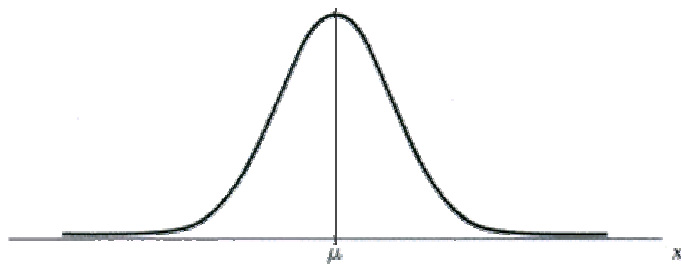


Figura 2.3 - Distribuição normal

Neste caso, o valor esperado de uma carga pode ser previsto e caracterizado por um desvio padrão obtido por um especialista.

As distribuições binomiais podem ser utilizadas para a representação de conjuntos de geradores iguais, já que geralmente os geradores são modelizados para apenas dois estados *on/off*. O seu valor médio e a sua variância são dados por [Allan e Al-Shakarchi, 1976]:

$$E(W) = \mu = ng(1 - FOR).P_N \quad (2.27)$$

$$\sigma^2 = ng.FOR.(1 - FOR).P_N^2 \quad (2.28)$$

onde ng representa o número de geradores, FOR é a taxa de saída forçada de serviço e P_N a potência nominal. Como se pode constatar (2.27-2.28), a distribuição inclui a indisponibilidade da máquina. Por exemplo, para 10 unidades de produção de 25 MW e uma FOR de 0.08 o valor médio esperado para a distribuição binomial seria de 230 MW.

Quando nenhuma das distribuições anteriores é adequada, podem ser utilizadas distribuições com variáveis discretas. Neste caso cada variável W surge com a respectiva probabilidade, sendo o somatório das probabilidades de cada variável igual à unidade.

Considerando que $W_1=10$ MW, $W_2=20$ MW, $W_3=30$ MW e $W_4=40$ MW teremos as probabilidades $P(W_1=10)=0.3$, $P(W_2=20)=0.5$, $P(W_3=30)=0.1$ e $P(W_4=40)=0.1$ (Figura 2.4). O valor esperado e o desvio padrão é no caso deste tipo de distribuições dado, respectivamente por (2.24) e (2.25).

A partir do momento em que se conhecem para todos os barramentos as funções para a produção e carga, o passo seguinte do TP probabilístico consiste na obtenção das potências

injectadas. A obtenção destas potências (sob a forma de funções de probabilidade) consegue-se por processos de convolução aplicados às distribuições de produção e carga de cada barramento.

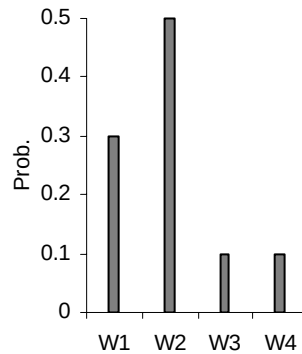


Figura 2.4 – Distribuição discreta, exemplo

Como resultados [Borkowska, 1974], são obtidas as distribuições de probabilidade dos fluxos de carga considerando a configuração e parâmetros da rede constantes. Para se obterem estas distribuições é novamente considerado um processo de convolução. Considerando o uso do modelo DC e generalizando, a expressão (2.23) pode ser reescrita como (2.29) onde k representa o ramo e j o barramento genérico. A expressão (2.30) completa o processo onde “•” representa o processo de convolução.

$$P_k = \sum_{j=1}^n A_{k,j} \cdot P_j \quad (2.29)$$

$$f(P_k) = f(A_{k,1} \cdot P_1) \bullet f(A_{k,2} \cdot P_2) \bullet \dots \bullet f(A_{k,n} \cdot P_n) \quad (2.30)$$

Em resumo, no PPF os dados de entrada, a carga e a produção são variáveis aleatórias dadas por distribuições de probabilidade. Os resultados, trânsitos de potência, argumentos das tensões, etc, são também distribuições de probabilidade. Assim nas equações que definem o problema do TP (2.13) e (2.14), Y é uma variável aleatória especificada (que pertence a uma dada distribuição de probabilidade e que pode ser obtida por processo de convolução) e K e Z são também variáveis aleatórias.

Evolução do PPF

Mais tarde, Dopazzo et al [1975], Allan e Al-Shakarchi [1977] estenderam a formulação inicial ao modelo AC. Os argumentos das tensões, as amplitudes das tensões os trânsitos de potência activa e reactiva, as perdas e a potências injectadas eram agora distribuições de

probabilidade. As soluções do PPF eram obtidas através da linearização das equações (2.13-2.14) do trânsito de potências. Esta formulação permitia obter, associadas aos resultados normais do trânsito de potências, expressões para valores médios, variância e desvio padrão. Existiam algumas dificuldades, como o facto de as variáveis aleatórias das potências activas, potências reactivas, amplitude e argumento das tensões não serem necessariamente independentes. Este aspecto levou a considerar algumas simplificações como a consideração da inexistência de correlação entre as variáveis. O tempo dispendido com a obtenção das distribuições de probabilidade (utilizando processos de convolução) era também considerável. Com a finalidade de reduzir o tempo computacional associado a este processo, Allan et al [1981] utilizam uma metodologia onde se linearizam as equações determinísticas do problema AC. O processo de linearização é realizado para um valor esperado (valor médio das distribuições de potência especificadas). No processo é utilizada a transformada de Fourier como forma de diminuir o tempo de simulação associado ao processo de convolução. O passo seguinte foi a consideração de correlação nas potências injectadas especificadas. A correlação é considerada em termos de dependências nodais por vários motivos. Estes motivos estão dependentes das relações carga/carga, geração/carga ou geração/geração consideradas para o sistema. Um grupo de cargas existente numa mesma zona poderá tender a aumentar ou diminuir devido a diversos factores (ambientais, sociais, etc) havendo um certo grau de dependência entre estas. Correlações considerando a geração poderão também ser consideradas devido à necessidade de ajustar as necessidades de produção em função da carga e perdas do sistema. Para conseguir a integração de correlação nos modelos probabilísticos, Leite da Silva e Arienti [1984] utilizam um *mix* de técnicas analíticas de convolução e método de Monte Carlo tendo aplicado a metodologia na avaliação da expansão do sistema brasileiro [Leite da Silva et al, 1990].

De forma a considerar o aumento da incerteza directamente relacionada com a dimensão dos SEE a estudar, Allan e Leite da Silva [1983] propõem uma metodologia analítica que considera a linearização de mais de um ponto nas equações de fluxo de carga com vista a melhorar a precisão dos resultados. Esta metodologia é baseada no conceito de trânsito de potência limite que é conhecido na terminologia inglesa por *Boundary Power Flow* (BPF). Este algoritmo permite encontrar intervalos de valores para as variáveis de estado e de saída (2.13) do problema a partir de intervalos fornecidos nas variáveis de entrada (2.14) provenientes das respectivas distribuições de probabilidade. Os resultados são em seguida utilizados para determinar múltiplos pontos de linearização para as equações do trânsito de potências. A finalidade deste processo é conseguir melhorar a solução do PLF nas regiões de

cauda das distribuições de probabilidade (menor incerteza nos resultados). Dada a sua importância no seio dos PLF, apresenta-se em seguida o BLF.

Parte-se de um valor determinístico para as variáveis de entrada que se denominará por Y_0 . Em seguida, utiliza-se o modelo determinístico de fluxo de carga para encontrar as variáveis de estado correspondentes (X_0) de acordo com (2.13). Neste caso adaptando (2.13) para o valor da variável de entrada obtém-se (2.31):

$$Y_0 = g(X_0) \quad (2.31)$$

Em seguida, lineariza-se (2.31) em redor do ponto (X_0, Y_0) sendo K o inverso da matriz Jacobiano do Newton-Raphson avaliado em X_0 .

$$\Delta X = K \cdot \Delta Y \quad (2.32)$$

$$\Delta X = K(Y - Y_0) \quad (2.33)$$

$$X = X_0 + \Delta X \quad (2.34)$$

Generalizando (2.35), para cada variável de estado X_i do vector X , ter-se-á:

$$X_i' = X_{0i} + \sum_{j=1}^m K_{ij} (Y_j - Y_{0j}) \quad (2.35)$$

onde m representa a dimensão do vector Y (e X) e K são os elementos da matriz Jacobiano invertida avaliados em X_{0i} .

A obtenção dos valores extremos (intervalo) de cada variável de estado X_i é conseguida considerando que em (2.35) cada variável de entrada Y_j é representada por um intervalo $[Y_j^{\min}, Y_j^{\max}]$. Se for pretendido o valor mínimo da variável de estado X_i (para a linearização anterior) terá de ser tido em conta o valor de K_{ij} . Se K_{ij} for positivo, X_i será mínimo se Y_j for também mínimo. Ao contrário se K_{ij} for negativo então X_i será mínimo se Y_j for máximo. Um princípio semelhante é aplicado quando se pretende o valor máximo de X_i . Assim, para uma dada variável de estado X_i (e respectivo ponto de linearização X_0) existe um conjunto de limites para Y que permite obter o mínimo (e o máximo) de X_i . Ou seja, em cada iteração será obtido um intervalo por cada variável de estado em função dos intervalos das diversas variáveis de entrada. Sejam os intervalos das variáveis de entrada denominados por Y_{bi}' . Utilizando (2.35) os valores limite (b) de X (agora X_{bi}') serão dados por (2.36):

$$Xb_i' = X_0 + K(Yb_i' - Y_0) \quad (2.36)$$

Como cada vector no espaço da solução tem de satisfazer (2.13), o novo valor de Yb_i' deve ser avaliado por (2.37):

$$Yb_i' = g(Xb_i') \quad (2.37)$$

Este processo pode ser repetido utilizando o novo ponto (Xb_i', Yb_i') como segundo ponto de linearização, sendo actualizada a variável Xb_i'' .

Ao contrário do DPF os valores limite das variáveis de saída não podem ser obtidos directamente dos valores (limite) de X . A expressão (2.38) permite o cálculo destas variáveis:

$$Z = Z_0 + L.(Y - Y_0) \quad (2.38)$$

$$L = S.K \quad (2.39)$$

Onde S corresponde ao Jacobiano de Z avaliado em X_0 . Se por exemplo é desejado o limite inferior de Z e se L é positivo então Y corresponde ao valor mínimo do intervalo da variável de entrada. Ao contrário se L é negativo então Y corresponde ao valor máximo do intervalo da variável de entrada. Desta forma consegue-se obter o intervalo das variáveis de estado do problema a partir de intervalos fornecidos nas variáveis de entrada provenientes das respectivas distribuições de probabilidade.

Outras publicações surgiram posteriormente [Leite da Silva et al, 1985; 1986; Leite da Silva e Arienti, 1990; Meliopoulos et al, 1990; Allan e Billinton 2000; Hu e Wang, 2006], avaliando, por exemplo, o erro cometido com as linearizações, as saídas forçadas de equipamentos, correlações, a melhoria dos processos de convergência, mas sempre seguindo a mesma filosofia do PPF.

Índices de adequação no PPF

A adequação do PPF é quantificada a partir de índices. Sendo conhecidas as funções densidade probabilidade das variáveis de saída (2.14) e considerando as limitações operacionais do sistema, podem obter-se os índices seguintes [Leite da Silva e Arienti, 1990]:

- Probabilidade de uma linha de transporte ou transformador estarem sobrecarregados;
- Probabilidade de a tensão nos barramentos estar fora dos limites aceitáveis;
- Probabilidade da produção ser insuficiente.

2.4.3 Modelos possibilísticos de TP

Nem sempre a incerteza assume um carácter probabilístico. Assim, muitas vezes é necessário contemplar dados cuja informação é vaga ou informação que pode estar associada a preposições da nossa linguagem natural. Uma forma adequada de tratar este tipo de incerteza, consiste na utilização de conjuntos difusos.

Os conjuntos difusos foram introduzidos por Zadeh [1965, 1978] para resolver problemas baseados em dados expressos de forma qualitativa ou afectados por imprecisão. A aplicação de conjuntos difusos em sistemas eléctricos pode ser encontrada em inúmeros assuntos. Por exemplo: em fiabilidade [Saraiva, 1992; Miranda 1998]; planeamento de redes com cargas e produções difusas e problemas de decisão [Matos e Ponce de Leão, 1995; Sarfi, 1996; Zimmermann, 1985; Miranda e Matos, 1988, Miranda e Matos 1989b; Miranda et al, 1990a]; trânsitos de potência [Miranda e Matos, 1989a; Miranda et al, 1989; 1990b]; redes eléctricas e outras redes [Miranda 1991]; sistemas eléctricos em geral [El-Hawary, 1998; Zimmermann, 1991].

No âmbito dos trânsitos de potência, os primeiros autores a considerar incerteza em TP foram Miranda e Matos [1989a]. O trânsito de potências difuso corresponde ao estudo do trânsito de potência em que pelo menos uma potência produzida ou uma potência de carga é representada por um número difuso. Geralmente são utilizados números difusos trapezoidais, triangulares ou rectangulares. Os modelos de FPF pretendem reflectir a incerteza que caracteriza as potências especificadas para os barramentos sobre as grandezas calculadas (Figura 2.5).

Na Figura 2.6 é apresentada a distribuição de possibilidade de um número difuso trapezoidal. Esta distribuição caracteriza-se por apresentar o nível $\alpha = 1$ num intervalo de valores $[a_2, a_3]$. Um número difuso possui uma função de pertença $p_F(x)$, que assume para cada x , um valor que poderá não ser 0 ou 1 (como sucede nos conjuntos binários), mas pertence ao intervalo $[0, 1]$. Esta propriedade permite a integração de afirmações de natureza qualitativa e subjectiva possibilitando o tratamento de incerteza difusa nos trânsitos de potência.

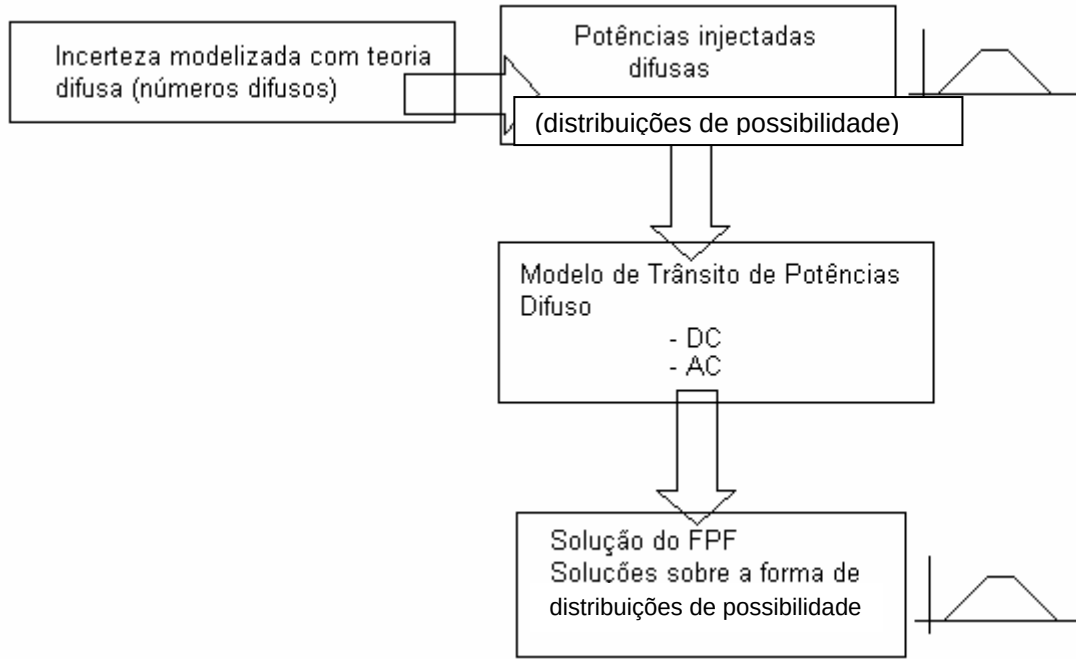


Figura 2.5 – Diagrama de blocos genérico de um FPF

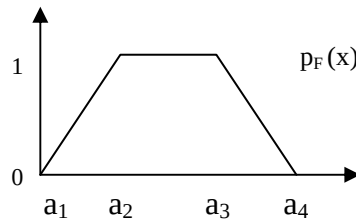


Figura 2.6 – Representação gráfica de uma distribuição de possibilidade de um número difuso trapezoidal

Um número difuso trapezoidal é caracterizado por um quarteto (a_1, a_2, a_3, a_4) sendo a sua função de pertença definida do seguinte modo (2.40):

$$p_F(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & \text{se } a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1, & \text{se } a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3}, & \text{se } a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0, & \text{se } x \geq a_4 \end{cases} \quad (2.40)$$

O corte de nível α , A_α , para todo o α entre 0 e 1 e que caracteriza um número difuso trapezoidal é dado por (2.41):

$$A_\alpha = [a_1^{(\alpha)}, a_4^{(\alpha)}] = [(a_2 - a_1)\alpha + a_1, (a_3 - a_4)\alpha + a_4] \quad (2.41)$$

Podem ainda ser definidos os números difusos triangulares (Figura 2.7) e rectangulares (Figura 2.8).

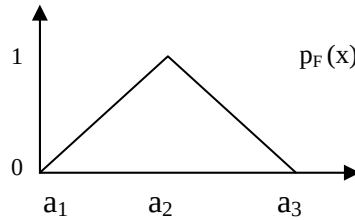


Figura 2.7 – Representação gráfica de uma distribuição de possibilidade de um número difuso triangular

Um número difuso triangular é caracterizado por um terceto (a_1, a_2, a_3) sendo a sua função de pertença definida por (2.42). O corte de nível α , A_α , para todo o α entre 0 e 1 e que caracteriza um número difuso triangular é dado por (2.43). No que se refere aos números rectangulares (Figura 2.8) a mesma informação é dada por (2.44) e (2.45).

$$p_F(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & \text{se } a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1, & \text{se } x = a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & \text{se } a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & \text{se } x \geq a_3 \end{cases} \quad (2.42)$$

$$A_\alpha = [a_1^{(\alpha)}, a_3^{(\alpha)}] = [(a_2 - a_1)\alpha + a_1, (a_2 - a_3)\alpha + a_3] \quad (2.43)$$

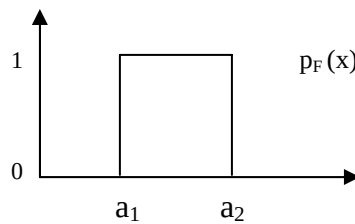


Figura 2.8 – Representação gráfica de uma distribuição de possibilidade de um número difuso rectangular

$$p_F(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a_1 \\ 1, & \text{se } a_1 \leq x \leq a_2 \\ 0, & \text{se } x \geq a_2 \end{cases} \quad (2.44)$$

$$A_\alpha = [a_1^{(\alpha)}, a_2^{(\alpha)}] = [a_1, a_2] \quad (2.45)$$

Os números rectangulares e triangulares constituem casos particulares dos números trapezoidais já que para os números rectangulares $a_1=a_2$ e $a_3=a_4$ e para os números triangulares $a_2=a_3$.

2.4.3.1 Especificação das potências injectadas

A capacidade dos números difusos para descrever matematicamente declarações qualitativas sobre carga e produção é ilustrada na Figura 2.9, onde são tratadas três situações: “carga entre 10 a 12 MW” (Figura 2.9a), “produção de cerca de 50 MW” (Figura 2.9b) e “carga possivelmente entre 50 e 55MW, mas poderá assumir valores entre 40 e 65 MW” (Figura 2.9c). No FPF, as variáveis de entrada (produção/carga) são números difusos. O resultado de cada variável de saída, como tensões e seus argumentos, ou trânsitos de potência, serão também representados por números difusos.

A partir dos dados disponíveis para as potências de produção e carga (potências especificadas) são calculadas as potências injectadas. Este conceito obedece, como se sabe, à diferença entre a potência gerada e a potência consumida. Simplesmente nos FPF e como se referiu, as potências geradas e consumidas são agora distribuições de possibilidade em lugar de números determinísticos (ou probabilísticos onde se utilizam operações de convolução).

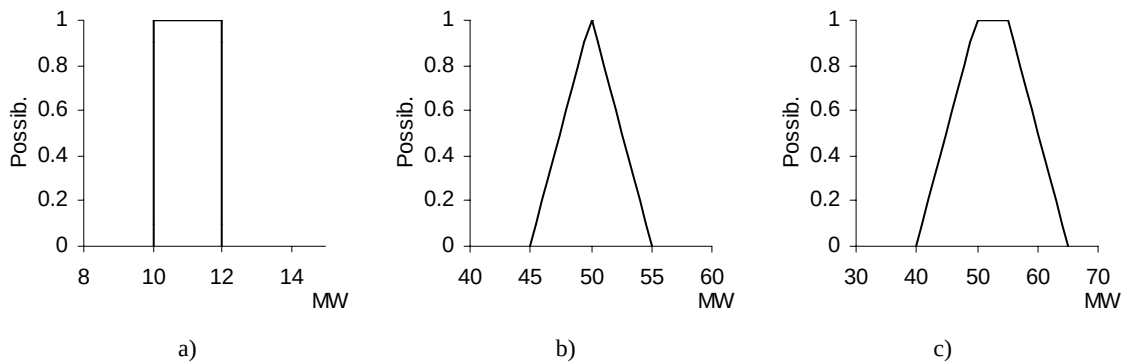


Figura 2.9– número difuso rectangular (a), triangular (b) e trapezoidal (c)

No FPF, as potências injectadas são calculadas recorrendo a operações de subtracção com números difusos. Admitindo dois números difusos trapezoidais A (produção) e B (carga), caracterizados por quartetos distintos respectivamente (a_1, a_2, a_3, a_4) e (b_1, b_2, b_3, b_4) , a operação de subtracção que permite obter a potência activa difusa injectada P_i no barramento genérico i , é dada em (2.46).

$$P_i = A - B = [a_1, a_2, a_3, a_4] - [b_1, b_2, b_3, b_4] = (a_1 - b_4, a_2 - b_3, a_3 - b_2, a_4 - b_1) \quad (2.46)$$

A mesma operação serve também para calcular a potência reactiva difusa injectada em cada barramento. Esta operação pode ser aplicada aos números difusos triangulares ou rectangulares já que, como se referiu estes são casos particulares dos números trapezoidais. Podem assim ser relacionados todos os tipos de números difusos na obtenção das potências injectadas. Poderá existir, por exemplo, produção modelizada por um número difuso triangular e carga modelizada por um número difuso trapezoidal.

2.4.3.2 Formulações Tradicionais do Trânsito de Potências Difuso

Tal como nos modelos determinísticos, são conhecidas duas formulações para o FPF: a versão completa, modelo AC FPF e a versão simplificada, modelo DC FPF.

Sobre a classificação dos barramentos, no FPF e no âmbito do modelo completo, esta é realizada da mesma forma do modelo determinístico, ou seja:

- Barramentos PQ, conhecem-se as distribuições de possibilidade das potências activas e reactivas produzidas e consumidas. Desconhecem-se as distribuições de possibilidade associadas aos ângulos e amplitudes das tensões.
- Barramentos PV, conhecem-se as distribuições de possibilidade das potências activas produzidas e consumidas e ainda das distribuições do mesmo tipo para as potências reactivas consumidas. Desconhecem-se as distribuições de possibilidade para as fases das tensões e para as potências reactivas geradas.
- Barramento de Referência e Compensação, desconhecem-se as distribuições de possibilidade das potências activas e reactivas produzidas. Conhecem-se os valores determinísticos para o ângulo e amplitude da tensão e as distribuições associadas às potências activas e reactivas de carga, se existirem.

Modelo DC Tradicional (DC FPF)

Após o reconhecimento de que os números difusos seriam uma melhor forma de capturar a incerteza associada a cargas e produções futuras, Miranda e Matos [1989a], desenvolveram a primeira formulação do trânsito de potências difuso (FPF). A formulação era baseada no modelo DC (2.47). Neste modelo, se $\tilde{P}$ é o vector difuso das potências injectadas nos barramentos, poderão ser obtidos os argumentos das tensões ($\tilde{\theta}$) e os trânsitos de potência ($\tilde{P}_L$) aproximados utilizando, respectivamente (2.48) e (2.49). Fazendo uso da matriz das sensibilidades os trânsitos de potência difusos poderão ser obtidos a partir de (2.50).

$$\tilde{P} = B.\tilde{\theta}. \quad (2.47)$$

$$\tilde{\theta} = B^{-1}.\tilde{P} \quad (2.48)$$

$$\tilde{P}_L = X_L^{-1}.\tilde{\theta}_L \quad (2.49)$$

$$\tilde{P}_L = A.\tilde{P} \quad (2.50)$$

onde A e B são respectivamente, as matrizes de sensibilidade e de admitâncias do modelo DC tradicional de trânsitos de potência. Neste modelo podem ser identificadas algumas situações importantes relacionadas com a assimetria do mesmo e que se referem mais adiante. No Capítulo 3 serão calculados os trânsitos de potência difusos para algumas redes.

Modelo AC Tradicional (AC FPF)

O modelo DC foi mais tarde estendido ao caso AC [Miranda et al, 1990b], utilizando uma expansão de primeira ordem em série de Taylor das equações dos trânsitos de potência. O procedimento básico para obtenção das tensões e dos ângulos consiste em resolver um trânsito de potência AC determinístico para os valores centrais dos dados difusos utilizando o algoritmo Newton-Raphson. Em seguida são calculadas as variações em redor deste ponto de funcionamento utilizando o Jacobiano da última iteração e matemática difusa.

O procedimento para o modelo AC difuso [Saraiva, 1992] é descrito segundo uma série de passos que se indicam a seguir.

Em primeiro lugar, é obtido um vector inicial determinístico das injeções nodais que é derivado das distribuições de possibilidade difusas especificadas. Em (2.51) CR corresponde ao operador de valor central que devolve os valores centrais P^{ctr} e Q^{ctr} das potências difusas injectadas.

$$\begin{bmatrix} P^{ctr} \\ Q^{ctr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CR(\tilde{P}) \\ CR(\tilde{Q}) \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

A partir dos valores centrais obtidos para as potências especificadas, é utilizado um método de trânsito de potências (geralmente o Newton-Raphson), para se obter o ponto central de funcionamento do SEE. Este ponto de funcionamento fica desta forma caracterizado pelos valores determinísticos das tensões e das fases (V^{ctr} e θ^{ctr}), dos trânsitos de potência activa e reactiva (P_{ik}^{ctr} e Q_{ik}^{ctr}), das produções (P_G^{ctr} e Q_G^{ctr}) e das perdas. Em seguida são calculados os desvios aos valores centrais ($\Delta \tilde{\theta}$ e $\Delta \tilde{V}$) utilizando o Jacobiano da última iteração (2.52) do problema determinístico. As funções de pertença $\tilde{\theta}$ e $\tilde{V}$ (2.53) e (2.54) são obtidas a partir do somatório dos valores centrais obtidos com os correspondentes desvios (2.52):

$$\begin{bmatrix} \Delta \tilde{\theta} \\ \Delta \tilde{V} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \tilde{P} \\ \Delta \tilde{Q} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\theta} \end{bmatrix} = [\theta^{ctr}] + \begin{bmatrix} \Delta \tilde{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{V} \end{bmatrix} = [V^{ctr}] + \begin{bmatrix} \Delta \tilde{V} \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

Os trânsitos de potência activa e reactiva, as perdas e as correntes nos ramos são funções não lineares dos argumentos e amplitudes das tensões nos barramentos extremos de cada ramo. Os seus desvios são aproximados (linearidades) por utilização de séries de Taylor. Desta forma é possível a obtenção de expressões aproximadas a funções lineares. Para o efeito consideram-se os termos de primeira ordem do desenvolvimento em série de Taylor em torno do ponto de funcionamento obtido no TP determinístico inicial. No caso dos trânsitos de potência activa (2.11), os desvios aproximados dos trânsitos de potência activa relativamente ao valor central são dados por (2.55):

$$\Delta P_{ik} \approx \frac{\partial f_A}{\partial V_i} \cdot \Delta V_i + \frac{\partial f_A}{\partial V_k} \cdot \Delta V_k + \frac{\partial f_A}{\partial \theta_i} \cdot \Delta \theta_i + \frac{\partial f_A}{\partial \theta_k} \cdot \Delta \theta_k \quad (2.55)$$

Podem ser obtidas, directamente a partir da matriz $[J]^{-1}$, expressões lineares para ΔV_i , ΔV_k , $\Delta \theta_i$, $\Delta \theta_k$, em termos de desvios de potência activa e reactiva injectadas. Substituindo estas expressões em (2.55) é obtida a expressão (2.56). Nesta expressão $SP_{ik,j}$ e $SQ_{ik,j}$ representam os coeficientes de sensibilidade relativos ao efeito dos desvios das potências injectadas no trânsito de potência activa no ramo genérico i-k.

$$\Delta P_{ik} \approx \sum_j SP_{ik,j} \Delta P_j + \sum_j SQ_{ik,j} \Delta Q_j \quad (2.56)$$

Se os desvios são representados por números difusos, caso de (2.52) para $\tilde{\Delta P}$ e $\tilde{\Delta Q}$, (2.56) vem:

$$\tilde{\Delta P}_{ik} \approx \sum_j SP_{ik,j} \tilde{\Delta P}_j + \sum_j SQ_{ik,j} \tilde{\Delta Q}_j$$

Desta forma, o trânsito de potência difuso pode ser calculado por:

$$\tilde{P}_{ik} = P_{ik}^{ctr} + \tilde{\Delta P}_{ik}$$

No que se refere a linearizações efectuadas pode dizer-se que este modelo recorre ao Jacobiano (que é já por si uma linearização) da última iteração, para obter os valores dos desvios das tensões e seus argumentos e em seguida para obter os valores dos desvios associados a trânsitos de potência, potências reactivas geradas e potência activa na barra de compensação, etc, onde efectua novas linearizações. Em consequência os resultados são também aproximações. Mais pormenores sobre a metodologia podem ser encontrados em Saraiva [1992], Saraiva et al [2004].

A assimetria no FPF e variantes do modelo

As formulações tradicionais [Miranda e Matos, 1989a; Miranda et al, 1990b; Saraiva et al, 1991; Saraiva e Miranda 1993; Saraiva et al, 2004] do problema de fluxo de cargas difuso utilizam a mesma definição que a metodologia determinística. Os barramentos de produção

são definidos como PV, os barramentos de carga como PQ. É ainda escolhido um barramento de referência dos argumentos que coincide com a escolha do barramento de compensação (no modelo AC).

No modelo DC determinístico não existe compensação uma vez que devido às simplificações realizadas (resistência nula dos ramos) não há perdas. No entanto, no DC FPF clássico, o barramento de referência tem involuntariamente uma função de compensação da incerteza relativa aos demais barramentos. Como consequência e por agregar a incerteza proveniente dos outros barramentos, é “normal” a obtenção de valores difusos de produção que ultrapassam os limites da capacidade do gerador.

No modelo AC é definido o barramento de compensação com a finalidade de realizar o equilíbrio entre a produção e a carga do sistema. De facto, este barramento além de compensar o erro na estimação das perdas (caso determinístico), vai também receber no caso do FPF, a incerteza remanescente proveniente dos demais barramentos da rede. Este aspecto cria (tal como no DC FPF) uma situação de assimetria, uma vez que o barramento de compensação e referência é tratado de forma distinta.

Distribuições de possibilidade, como a da Figura 2.10, com valores que ultrapassam o limite de produção do gerador (que neste caso seria de 410 MW), são assim possíveis para as formulações clássicas de ambos os modelos difusos (DC ou AC). Com a finalidade de tratar este problema, mais tarde, outras contribuições ao FPF introduziram procedimentos de correcção relativos à incerteza excessiva acumulada no barramento de compensação [Saraiva et al, 1991; Saraiva 1992]. Assim a nova distribuição de possibilidade seria semelhante à que se apresenta na Figura 2.11, onde se força o valor limite de geração. No entanto, esta situação não resolve de forma definitiva o problema. De facto, apesar de se limitar a produção no barramento de compensação, este barramento continua a concentrar a incerteza resultante dos restantes barramentos do SEE até esse limite, mantendo-se uma situação de assimetria. O barramento de compensação continua diferente dos restantes barramentos (na maior parte dos casos, nem sequer é definida nos dados, produção difusa para este barramento).

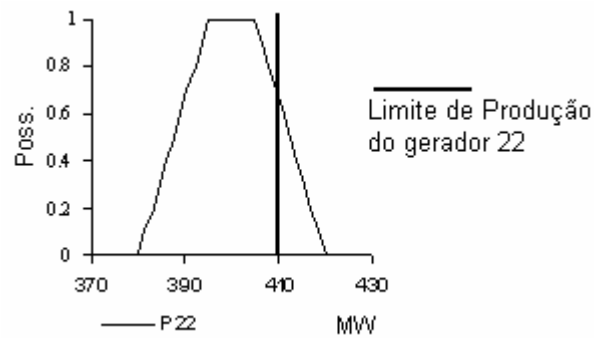


Figura 2.10 – Distribuição difusa para a potência produzida num gerador

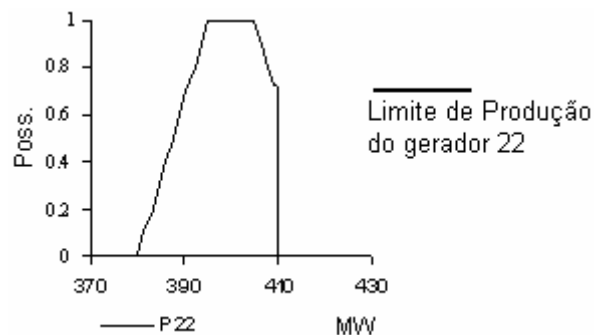


Figura 2.11 – Distribuição difusa para a potência gerada num gerador com limites de produção

Surgiram também algumas variantes ao algoritmo inicial como a inclusão de correlações no modelo [Saraiva et al, 2004] e um procedimento iterativo baseado no BLF com a finalidade de atingir maior precisão dos resultados [Dimitrovski e Tomsovic, 2004a] e que modeliza as variáveis de entrada com números difusos. Este algoritmo segue o conceito de BLF no contexto dos PLF obtendo-se neste caso intervalos não estatísticos para os trânsitos de potência. A metodologia faz uso do vector gradiente das variáveis de estado e de saída, disponível, respectivamente em cada linha de K (2.36) e de L (2.39). Tal como num processo de optimização, a direcção do gradiente pode ser seguida iterativamente. Desta forma é possível obter os pontos extremos das variáveis de estado e de saída. Neste processo é garantido através de um algoritmo, que os valores do intervalo das variáveis de entrada não são violados. Sucintamente e usando a mesma notação do BPF probabilístico, o processo consiste no seguinte: supondo que era desejado o valor mínimo de X_i (2.36). Se X_{ij} é positivo então o valor de Y_j (intervalo de valores possíveis para cada variável de entrada) desce. Depois de repetir o processo para todos Y_j é obtido um novo vector das variáveis de entrada Y , Y_{b_i}' a partir do qual pode ser calculado um novo vector das variáveis de estado utilizando (2.13), X_{b_i}' . A partir desta nova solução do fluxo de carga (X_{b_i}' , Y_{b_i}'), os passos anteriores

são repetidos até que uma das condições seja verdadeira para cada uma das variáveis de entrada: a derivada parcial é positiva sendo a variável associada um mínimo; a derivada parcial é negativa sendo a variável associada um máximo; a derivada parcial é zero. Se a condição final não se verificar para nenhuma variável então a solução é um extremo local. Este processo tem de ser repetido para todas as variáveis de entrada e de saída e implica que se realizem vários TP para cada variável, sendo por este motivo, computacionalmente intenso. A utilização de vários TP determinísticos envolve, como é sabido, o recurso a várias linearizações. Em resumo, esta metodologia iterativa fornece os valores limite das variáveis com função de pertença zero, o que poderá não ser interessante para o operador (o FPF devolve as distribuições de possibilidade o que poderá ser mais satisfatório). O algoritmo devolve conjuntos de intervalos para as variáveis de estado e de saída obtidos a partir de conjuntos de intervalos utilizados nas variáveis de entrada. Também neste modelo, o problema da assimetria no barramento de compensação subsiste, já que se considera um barramento para esse efeito. Ainda sobre o BLF, a metodologia não considera os limites de potência reactiva nos barramentos PV. Mais pormenores sobre a metodologia podem ser encontrados em [Dimitrovski e Tomsovic, 2004a; 2004b].

Outras metodologias, como “interval power flow” [Wang e Alvarado, 1992] ou contribuições mais recentes [Pajan e Paucar, 2002; Bijwe et al, 2005] residem na mesma filosofia do FPF clássico. Por exemplo, a aritmética intervalar [Wang e Alvarado, 1992] consiste em considerar intervalos de incerteza nas cargas e em função destes determinar os intervalos de incerteza dos trânsitos de potência. A consideração de intervalos desta forma obedece às regras das operações com números difusos, mas não considera o princípio da extensão que permite a generalização de operações matemáticas definidas em termos determinísticos. Nas operações é admitida independência entre as variáveis que não existe na realidade, o que leva à introdução de incerteza artificial. Mais ainda, a consideração de intervalos é de facto um caso particular dos números difusos.

Também com a finalidade de reduzir o excesso de incerteza no barramento de compensação foram apresentadas outras contribuições. Dimitrovski e Tomsovic [2004b, 2005a, 2005b] apresentam dois métodos baseados no conceito de BLF. Um dos métodos é semelhante ao processo de conversão de barramentos PV para PQ com limites de potência reactiva. Durante a resolução do problema de fluxo de cargas sempre que a potência reactiva produzida (ou consumida) num barramento PV exceder os limites de físicos de produção, o valor desta potência é fixado nesses limites e a amplitude da tensão é relaxada. Seguindo este princípio,

sempre que a potência produzida (ou consumida) no barramento de compensação ultrapassa os limites físicos impostos, esta é fixada nesses limites. Em seguida, a potência activa em outros barramentos PV é relaxada de forma a permitir a resolução do problema. O outro método proposto pelos autores consiste em escolher previamente o número de barramentos PV que irão receber os excessos de carga (ou produção). Neste caso não existem conversões de barramentos. Em qualquer dos métodos propostos [Dimitrovski e Tomsovic 2004b, 2005a] a incerteza é repartida apenas pelos barramentos PV escolhidos e não por todos os barramentos.

Sun et al [2000] propuseram uma metodologia baseada em procedimentos de optimização não linear. Nesta formulação é definido um barramento para compensação mas não é definida qualquer distribuição de possibilidade para este barramento. Como nos métodos clássicos o potência produzida neste barramento ultrapassa os limites do gerador consequência da existência de trânsitos de potência não viáveis (assunto a tratar no Capítulo 3). Em alternativa os autores propõem também uma forma de minimizar o tempo de simulação da formulação não linear procedendo ao cálculo apenas dos pontos extremos, sendo os restantes pontos encontrados por procedimentos de linearização. Podem encontrar-se ainda outras publicações envolvendo optimização e FPF, por exemplo [Hao et al, 2004]. Nestes modelos não são analisadas situações de restrição de ramos e tal como nas formulações anteriores de FPF, o barramento de compensação é tratado de forma diferente dos restantes. A incerteza do barramento de compensação é partilhada por outros barramentos PV o que novamente resulta numa situação de assimetria.

Em qualquer dos casos enunciados, o barramento de compensação continua a ser tratado de uma forma diferente de todos os outros. Quer se trate do modelo DC ou AC, a incerteza não é partilhada por todos os barramentos sendo a escolha do barramento de referência determinante para a definição dos resultados. A incerteza nas potências injectadas do barramento de compensação depende das incertezas das potências injectadas dos outros barramentos. Este problema foi identificado por Miranda et al [1992] que considera que na definição de um problema difuso deve ser caracterizada a incerteza em todos os barramentos. Em alinhamento com esta questão da assimetria (e também da precisão dos resultados), foram definidas metodologias para o FPF [Matos e Gouveia, 2005, 2008; Gouveia e Matos, 2006; 2007; 2008] capazes de tratar o problema. Na língua inglesa estas metodologias têm sido denominadas por *Symmetric Fuzzy Power Flow* (SFPP), constituindo a base deste trabalho, a apresentar no Capítulo 3.

Finalmente, um aspecto importante a realçar nas metodologias clássicas são as linearizações que são realizadas (tal como sucede nos modelos determinísticos). Este aspecto conduz, como é sabido, a uma menor precisão dos resultados.

2.4.4 Trânsito de Potências Ótimo

Os algoritmos de FPF apresentados permitem a obtenção de diversas grandezas sob a forma de números difusos não estando a obtenção destas grandezas condicionada por questões económicas ou técnicas (por exemplo os limites associados aos trânsitos de potência nos ramos). Por outro lado, e como tem sido referido, a avaliação da rede de transporte é realizada para o nível HL2 incluindo portanto o sistema produtor. Ora a inclusão de aspectos económicos como os custos de produção de cada máquina do parque produtor e as restrições à capacidade de transporte dos ramos levou à definição do Trânsito de Potências Ótimo (na terminologia inglesa, *Optimal Power Flow*, OPF).

O OPF surge na década de 60 a partir do *despacho económico*. O despacho económico tem por finalidade a satisfação da carga com custos mínimos para o parque produtor. O despacho económico é formulado como um problema de optimização minimizando custos de produção do parque produtor, considerando limites dos geradores e a equação de equilíbrio entre a produção e a carga do sistema. Contudo, ignora restrições técnicas relativas aos limites dos TP. Com a inclusão no problema das restrições de segurança e equações dos modelos de fluxo de potências surge o OPF. Como referência clássica desta área pode indicar-se o trabalho de Carpentier [1962; 1979] que apresenta um problema de minimização do custo de produção, considerando equações de balanço de potência activa e reactiva e limitações físicas dos equipamentos como restrições.

O OPF é uma ferramenta utilizada normalmente para a operação do sistema. Esta formulação permite, para cada estado de operação do sistema, verificar se a carga é satisfeita sem que nenhum limite físico (limites de produção de potência activa ou reactiva, limites de transporte nas linhas, etc) ou operacional (limites das tensões nos barramentos) seja violado.

A formulação genérica de um OPF pode ser descrita pelas expressões (2.57):

$$\begin{aligned}
& \min f(x) \\
& s.j : \\
& g(x) = 0 \\
& h(x) \leq 0 \\
& l \leq x \leq u
\end{aligned}
\tag{2.57}$$

A finalidade de um OPF consiste assim em determinar o ponto óptimo de funcionamento do sistema sujeito a critérios de operação e segurança. As suas funções objectivo, $f(x)$ poderão oferecer variações, por exemplo, entre minimização das perdas nos ramos, minimização de custos de produção nos geradores entre outras. As restrições de igualdade, $g(x)$, correspondem às equações do trânsito de potências. As restrições de desigualdade $h(x)$, correspondem a limites máximos e mínimos de todas as variáveis de controlo e de estado (módulo da tensão nos barramentos PQ, correntes máximas admissíveis nos ramos; limites máximos da potência produzida nos geradores; limites no desfasamento das tensões).

Apesar ser normalmente aplicado na operação do sistema o OPF pode também ser utilizado na avaliação da adequação. Uma das situações possíveis corresponde a limitar a potência de carga cortada [Hadju et al, 1968; Subramanian, 1971]. Mais adiante será apresentado o problema formulado para o caso possibilístico.

A necessidade de considerar a incerteza derivada do SEE e sua evolução do sector, levou, também para o OPF, à edição de publicações considerando incerteza do tipo probabilística [Madrigal et al, 1998; Verbic et al, 2006] e incerteza do tipo difusa [Miranda e Saraiva, 1992, Saraiva e Miranda, 1993; 1994a; Saraiva et al 1994c; Xiaohong et al, 1995; Kubokawa et al, 1999]. Assim, também esta metodologia à semelhança dos modelos convencionais de TP passou a integrar modelização da incerteza nos dados recorrendo a números difusos resultando assim o Trânsito de Potências Óptimo Difuso (na terminologia inglesa, *Fuzzy Optimal Power Flow*, FOPF).

Miranda e Saraiva [1992] apresentam um FOPF cuja função objectivo corresponde à minimização dos custos marginais de produção. As restrições deste problema são os limites das potências produzidas nos geradores, limites da potência de carga, equação de balanço entre a produção e consumo e limites de trânsito de potência nos ramos. Como resultados poderão ser obtidas as potências difusas produzidas pelos geradores e os trânsitos de potência difusos nos ramos. Para os valores obtidos é verificado se algum dos TP apresenta violação

dos limites técnicos dos ramos. Se existir uma situação de constrangimento é possível a aplicação de uma metodologia [Miranda e Saraiva, 1992] baseada em técnicas incrementais onde se obtêm os desvios relativos à produção inicial que permitem anular a violação referida.

O problema de OPF poderá revelar uma solução impossível se para as restrições enunciadas não for possível satisfazer a carga do sistema (perspectiva de inadequação do sistema para satisfação da carga). Saraiva [1992] propõe uma solução para a resolução desta situação por integração de geradores de corte de carga no problema (2.58). O objectivo é calcular o menor valor da potência de corte de carga que permite a viabilização do FOPF. Neste caso a função objectivo além de minimizar os custos marginais de produção para cada gerador (como sucede na formulação original do FOPF) integra mais uma parcela relativa à potência produzida no gerador de corte de carga ligado a um barramento i .

O modelo para o caso DC pode ser descrito pelos passos seguintes: resolução de um problema de trânsito de potência óptimo determinístico com vista a obter o ponto de funcionamento óptimo do sistema; integração da incerteza nas potências de carga especificadas; determinação dos cortes de nível α das grandezas a calcular por utilização de técnicas de programação paramétrica; a partir dos cortes de nível α calculados, construção das funções de pertença a que se referem as grandezas.

O OPF determinístico inicial é calculado a partir de (2.58 -2.64) e admite na função objectivo uma parcela destinada a minimizar o corte de carga. O valor da potência de corte de carga é calculado considerando geradores de corte de carga nos barramentos onde existe carga. Estes geradores são incluídos na função objectivo com um custo (G) associado. O valor deste custo é bastante maior que o maior custo de produção dos geradores da rede (c). Desta forma pretende-se garantir que no problema de optimização, as variáveis relativas aos geradores de corte de carga apenas se tornam variáveis básicas se a perturbação identificada no sistema não for ultrapassada. A função objectivo definida para este problema (2.58), permitirá obter uma solução de custo de produção mínimo onde em paralelo se minimiza a potência produzida nos geradores de corte de carga (minimização da potência não fornecida).

$$\min z = \sum c_i . P_{gi} + G \sum PNF_i \quad (2.58)$$

onde P_{gi} e PNF_i representam, respectivamente a potência activa gerada no gerador do barramento i e a potência não fornecida no barramento i.

Suj. a restrições de operação

$$\sum P_{gi} + \sum PNF_i = \sum PC_i^{ctr} \quad (2.59)$$

$$P_{gi} \leq P_{gi \max} \quad (2.60)$$

$$P_{gi} \geq P_{gi \min} \quad (2.61)$$

$$PNF_i \leq PC_i^{ctr} \quad (2.62)$$

$$\sum a_{ji} \cdot (P_{gi} - PC_i^{ctr} + PNF_i) \leq P_{j \max} \quad (2.63)$$

$$\sum a_{ji} \cdot (P_{gi} - PC_i^{ctr} + PNF_i) \geq P_{j \min} \quad (2.64)$$

As restrições (2.60) e (2.61) referem-se aos limites de produção do gerador no barramento i enquanto que a restrição (2.62) representa a máxima potência de corte de carga no barramento i. Este limite corresponde ao valor central da função de pertença da carga neste barramento (PC_i^{ctr}). As restrições (2.63) e (2.64) são relativas aos limites do trânsito de potência. Nestas restrições a_{ji} corresponde ao coeficiente de sensibilidade do modelo DC que relaciona o trânsito de potência no ramo j com a potência activa injectada no barramento i.

O passo seguinte consiste em integrar a incerteza na carga. Para o corte $\alpha=0$ a incerteza da carga pode ser integrada considerando parâmetros Δ_i (2.65) relativos a cada distribuição. A restrição de balanço passa a ser dada por (2.66) e as restrições de limite de trânsito de potência por (2.67) e (2.68).

$$\Delta_i = PC_i - PC_i^{ctr} \quad (2.65)$$

$$\sum P_{gi} + \sum PNF_i = \sum (PC_i^{ctr} + \Delta_i) \quad (2.66)$$

$$\sum a_{ji} \cdot (P_{gi} - PC_i^{ctr} + PNF_i) \leq P_{j \max} + \sum a_{ji} \Delta_i \quad (2.67)$$

$$\sum a_{ji} \cdot (P_{gi} - PC_i^{ctr} + PNF_i) \geq P_{j \min} + \sum a_{ji} \Delta_i \quad (2.68)$$

O problema de OPF determinístico (2.58-2.64) passa a integrar as incertezas da carga (FOPF) e é em seguida formulado como um problema de programação linear multiparamétrica. Este problema é representado pelo conjunto de equações (2.69 -2.71):

$$\min z = c^t X \quad (2.69)$$

Sujeito às restrições:

$$A.X = b + b'(\Delta) \quad (2.70)$$

$$\Delta_{i \min} \leq \Delta_i \leq \Delta_{i \max} \quad (2.71)$$

onde: A é a matriz das sensibilidades no modelo DC, X é o vector das variáveis, b é o vector dos termos independentes e $b'(\Delta)$ é um vector integrando os termos dependentes de Δ_i nas restrições do problema. Em (2.70) e para as expressões do tipo (2.66), (2.67) e (2.68) o vector $b'(\Delta)$ é respectivamente dado por: $\sum \Delta_i$, $\sum a_{ij} \cdot \Delta_i$ e $-\sum a_{ij} \cdot \Delta_i$. Os parâmetros Δ_i estão directamente associados aos valores extremos que cada variável básica pode assumir.

A formulação paramétrica permitirá encontrar as soluções óptimas e admissíveis do problema de optimização sendo construídas as distribuições de possibilidade para os geradores do sistema, potências de corte de carga e trânsitos de potência activa. Mais detalhes sobre este modelo podem ser encontrados em Saraiva [1992], Saraiva e Miranda [1994 a] ou Saraiva et al [1994 c].

2.5 AVALIAÇÃO CLÁSSICA DA FIABILIDADE DE UM SISTEMA ELÉCTRICO DE ENERGIA

A fiabilidade pode ser definida [Billinton, 1970] como “a probabilidade de um sistema ser capaz de desempenhar as suas funções de forma adequada, num dado período de tempo e nas condições de funcionamento especificadas”. Neste contexto, a medição da capacidade de um SEE na produção da energia eléctrica e seu transporte para satisfação dos pontos de carga, é denominada por avaliação da fiabilidade. A fiabilidade é normalmente dividida em duas vertentes [Allan e Billinton, 2000]: adequação e segurança.

A adequação no contexto da fiabilidade, refere-se à existência de estruturas (equipamentos) suficientes no sistema de forma a satisfazer a carga do sistema. Estas estruturas, na versão clássica para o sistema composto, são as necessárias para produzir energia em quantidades suficientes e para a transportar até aos pontos de entrega. A adequação está associada a condições estáticas e análise a longo prazo. A adequação não considera perturbações no sistema e é utilizada para descrever um estado do sistema onde a entrada/saída nesse estado é ignorada.

A segurança refere-se à capacidade que o sistema terá para responder a perturbações (perda abrupta de geração ou de elementos da rede de transporte), estando associada a condições dinâmicas e análise de curto-prazo.

O interesse na fiabilidade do sistema composto [Pereira e Balu, 1992] aumentou na América do Norte durante os anos 70 devido a alterações no sector eléctrico de que são exemplo a entrada dos produtores independentes de electricidade. Existiam na altura limitações à construção de novas infra-estruturas de transporte que apenas poderiam ser tratadas através de métodos que incluíssem os efeitos simultâneos da produção e do transporte.

De acordo com a *Electric Power Research Institute*, EPRI [1989] as principais áreas para a avaliação do sistema composto que requerem ferramentas de análise de fiabilidade são as seguintes:

- a) objectivo de transporte de capacidade (determinar a capacidade de transporte na rede interna e para redes exteriores interligadas);
- b) reforços da rede interna de transporte (decisões de investimento em estruturas de transporte – novas linhas, reforço de linhas, etc) de acordo com a existência de geração distribuída e com a gestão de cargas na rede;

c) efeito da localização dos geradores (avaliação do impacto de diferentes localizações de grandes unidades de produção e de produção distribuída incluindo equipamento de armazenamento).

As metodologias existentes para avaliação da adequação devolvem como resultado um conjunto de índices que permitem quantificar a fiabilidade do sistema. Classicamente, a incerteza na potência de carga é tratada com técnicas probabilísticas assim como a caracterização dos estados de avaria dos componentes. Os equipamentos modelizados na avaliação da fiabilidade do sistema composto são as unidades de produção, as linhas de transporte, os transformadores, etc. Cada um destes elementos pode ser encontrado num conjunto de estados possíveis.

Dado que este trabalho versa a rede de transporte, em seguida referem-se apenas os índices de adequação utilizados em estudos de fiabilidade para o sistema composto. Existem índices locais e globais. Índices globais ou de sistema representam o comportamento de todo o sistema. Os índices locais representam a fiabilidade nos barramentos individuais e são úteis para indicar pontos fracos no sistema, permitindo comparar impactos devidos a eventuais investimentos em componentes. Em seguida são identificados alguns dos principais índices utilizados para o sistema composto. Billinton e Allan [1996] apresentam uma listagem completa destes índices.

BPII (bulk power interruption index) - índice de interrupção do sistema composto, (MW(MW.ano))

$$BPII = \sum_{i \in S} \frac{C_i F_i}{L}$$

onde: L representa a ponta de carga anual em MW; C_i é o corte de carga (MW) do sistema associado ao estado i e F_i = frequência de abandono do estado i do sistema

BPECI (bulk power/energy curtailment index) – índice de corte de fornecimento de energia do sistema composto, (MWh(MW.ano)).

$$BPECI = \frac{EENS}{L}$$

e EENS (expected energy no supplied) – calcula a energia esperada não fornecida (MWh/ano)

$$EENS = \sum_{i \in S} C_i F_i D_i$$

onde D_i é a duração do estado i (h). O índice é semelhante ao LOEE nos estudos HL1.

SI (severity index) - severidade (min/ano)

$$SI = BPECI.60$$

Este índice representa a duração equivalente (em minutos) da perda de toda a carga durante condições de ponta de carga.

Para se fazer uma análise correcta dos índices é necessário simular vários estados em que o sistema poderá residir. Os estudos de fiabilidade podem ser representados de uma forma simplificada pelo diagrama seguinte (Figura 2.12). No bloco 1 são definidos os dados do problema. Estes dados são as indisponibilidades dos recursos energéticos (por exemplo hidrológicos), das unidades de produção (FOR) e do equipamento de transporte (linhas, transformadores, etc). As cargas são também definidas para cada barramento considerando incerteza. Na selecção de estados (bloco 2), cada estado do sistema é escolhido a partir de uma combinação de estados possíveis para produção e carga e relativos ao equipamento de transporte. Um sistema é composto por n componentes e cada componente pode residir num conjunto de estados possíveis. Por exemplo, uma linha pode-se encontrar num estado de serviço ou num estado de fora de serviço. Um estado do sistema é assim representado por um vector X (2.72) onde x_i corresponde ao estado do componente i .

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n] \quad (2.72)$$

A escolha de um estado corresponde às situações mais severas e mais prováveis de ocorrer. Existem técnicas para a selecção de estados que estão indicadas na secção 2.6. Estes estados podem corresponder a situações da rede em regime normal ou regime de contingência. A probabilidade de ocorrência de um estado X , onde os componentes x_i que o caracterizam se considera poderem estar $(1-p_i(A))$, ou não $(p_i(A))$, disponíveis pode ser calculada por (2.73):

$$p(X) = \left[\prod_{i=1}^{na} (1 - p_i(A)) \right] \cdot \left[\prod_{i=na+1}^n (p_i(A)) \right] \quad (2.73)$$

Neste caso considera-se que existem “na componentes disponíveis” e que as avarias são aleatórias e independentes. Em seguida e para o estado seleccionado são calculados os índices

de fiabilidade (bloco 3) e agregados os resultados (bloco 4). Se for seleccionado um novo estado (bloco 5), repete-se o processo, caso contrário são devolvidos os resultados finais (bloco 6). Combinando as probabilidade de ocorrência dos estados com os índices obtidos para cada estado, o resultado final será um valor esperado que reflecte o impacto do equipamento na fiabilidade do sistema [Billinton e Mo, 2003].

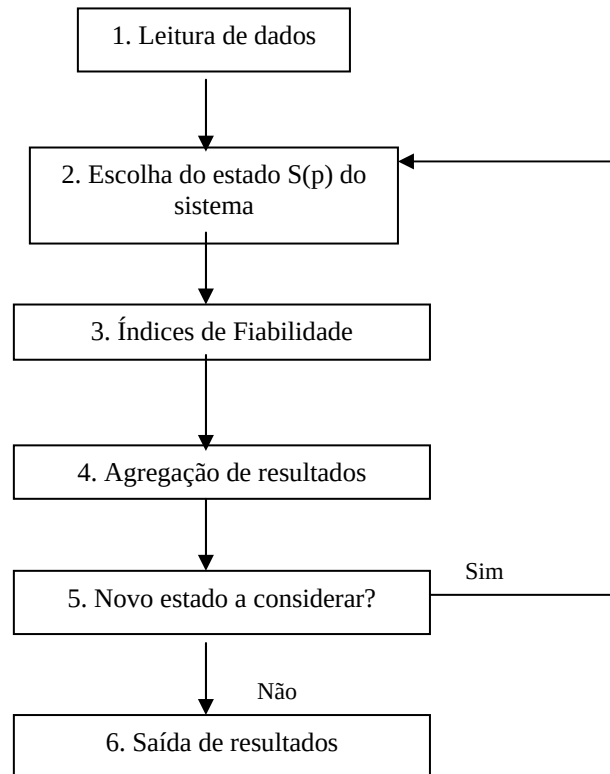


Figura 2.12 – Algoritmo simplificado para obtenção de índices de fiabilidade para o sistema composto

2.6 TÉCNICAS DE SELECÇÃO DE ESTADOS PARA TP OU EM ESTUDOS DE FIABILIDADE

O problema do TP permite a avaliação de um estado específico do sistema que se estuda (HL2). Este estado pode ser um estado normal ou um estado de contingência. A selecção do estado a avaliar é portanto um ponto importante. Existem [Caglar e Ozdemir, 1999] três metodologias para a selecção de estados (métodos analíticos, de simulação e mistos), não cabendo neste trabalho a sua discussão em rigor.

Nos métodos analíticos, os sistemas são descritos por um modelo matemático. Neste modelo os estados são seleccionados em função da ordem crescente da contingência. Ou seja, sem avarias, avarias de 1ª ordem, 2ª ordem, etc. O processo pára normalmente num dado nível de contingência ou quando a probabilidade de ocorrência do estado é menor que um valor especificado [Allan e Billinton, 2000]. A enumeração de estados permite limitar o espaço dos estados (conjunto total de estados em que o sistema pode residir). Basicamente selecciona-se um conjunto de estados em que se consideram os seguintes critérios: número de contingências (especifica-se a ordem das contingências); probabilidade das contingências (desprezam-se as contingências com probabilidade inferior a um valor definido); severidade das contingências (consideração de contingências que conduzem a uma operação severa do sistema). A enumeração de contingências é baseada no conceito de probabilidade condicionada [Billinton e Allan, 1988]. Os métodos analíticos, por motivos óbvios, são de difícil aplicação para sistemas de dimensão real. Nestes casos é normal a utilização de técnicas de simulação.

De facto, o número de estados de um sistema pode ser enorme. Por exemplo, uma pequena rede com 20 linhas e 2 geradores tem 4 194 304 estados possíveis. Neste caso, nos estudos de fiabilidade, o comportamento do sistema é avaliado considerando todos os seus estados (onde os componentes estão ou não disponíveis), por uma função genérica $F(X)$ que fornece uma avaliação probabilística do valor esperado:

$$E(F) = \sum F(X).p(X) \quad (2.74)$$

As técnicas de simulação permitem a escolha dos estados a partir da geração de números aleatórios.

Como o número de estados pode ser enorme, é estimado o valor de $F(x)$ considerando apenas uma amostra (N) do espaço dos estados (2.75), onde i representa o estado do sistema:

$$\hat{E}(F) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F(X_i) \quad (2.75)$$

Os estados a analisar são sorteados dentro desta amostra. Estados que têm uma grande probabilidade de ocorrência são mais prováveis de ser simulados sendo igualmente provável que sejam simulados várias vezes. Nos modelos analíticos um estado apenas é simulado uma vez. O facto de se considerar uma amostra e não o conjunto de todos os estados do sistema implica a obtenção de um erro para (2.75) relativamente a (2.74). Este erro não deve ser superior a um valor especificado. Para este valor pode ser calculada a *dimensão da amostra* (N). Considerando a variância de F (2.76) e a variância da amostra de valores esperados de F determinados com diversas amostras de X (2.77), a *imprecisão relativa* (ou coeficiente de variação da estimativa de E(F)) obtém-se por (2.78).

$$\hat{V}(F) = \frac{1}{N-1} \sum \left(F(X_i) - \hat{E}(F) \right)^2 \quad (2.76)$$

$$V(\hat{E}(F)) = \frac{\hat{V}(F)}{N} \quad (2.77)$$

$$\beta^2 = \frac{V(\hat{E}(F))}{\hat{E}(F)^2} \quad (2.78)$$

A dimensão da amostra para uma dada imprecisão máxima admitida é dada por (2.79) e depende da variação da estimativa e da imprecisão definida pelo utilizador. De referir que com a finalidade de reduzir o tempo de simulação, existem técnicas de redução da variância, como a amostragem antitética ou a variável de controlo, [Billinton e Li, 1994] que para a mesma imprecisão permitem reduzir a dimensão da amostra.

$$N = \frac{\hat{V}(F)}{\left(\beta \hat{E}(F) \right)^2} \quad (2.79)$$

Nas técnicas de simulação o processo é dividido em três fases: sorteio dos estados; análise de adequação dos estados; cálculo dos índices. O processo irá parar após um número fixo de simulações. Os valores esperados dos índices de adequação são a média dos índices obtidos em cada simulação. A técnica de simulação mais conhecida é o Método de Monte Carlo (MMC), Figura 2.13. Existem duas técnicas de simulação com Monte Carlo: técnica sequencial (sorteio sequencial – natureza cronológica) e técnica não sequencial (sorteio aleatório - natureza não cronológica) [Mello et al, 1994].

A técnica não sequencial (MMC não sequencial), sobre o período de tempo simulado, sorteia os intervalos de tempo a examinar de forma aleatória sendo obtido um estado de sistema não cronológico. Ou seja, não existe preocupação com a cronologia do processo de funcionamento do sistema. O sorteio é baseado na distribuição de probabilidade dos estados de funcionamento dos componentes. As amostras que se retiram correspondem a “fotografias” dos estados das variáveis aleatórias do sistema.

Na técnica sequencial o processo corresponde a sortear sequências de estados de funcionamento do sistema baseadas na distribuição de probabilidade da duração do estado dos componentes (i.e. a probabilidade do tempo de residência do componente num dado estado). As sequências são sorteadas por vários períodos predeterminados, geralmente anos e são designadas por séries sintéticas anuais. Esta técnica baseada no MMC é também conhecida por simulação de Monte Carlo sequencial (MMC sequencial).

A escolha de uma técnica ou de outra depende da influência que a história do sistema tem no seu comportamento. A técnica não sequencial pode ser utilizada se a história não tiver qualquer efeito, mas a técnica sequencial apenas deve ser utilizada se o passado do sistema afectar as condições do presente. Este é a situação de um sistema contendo unidades hídricas em que a utilização passada dos recursos de energia afecta, afecta a capacidade de fornecer energia nos intervalos subsequentes [Billinton e Allan, 1996].

O principal problema do MMC é o tempo computacional associado, já que a precisão de resultados é proporcional ao número de sorteios que se realiza. A par com esta desvantagem existe também a questão da convergência necessária ao algoritmo.

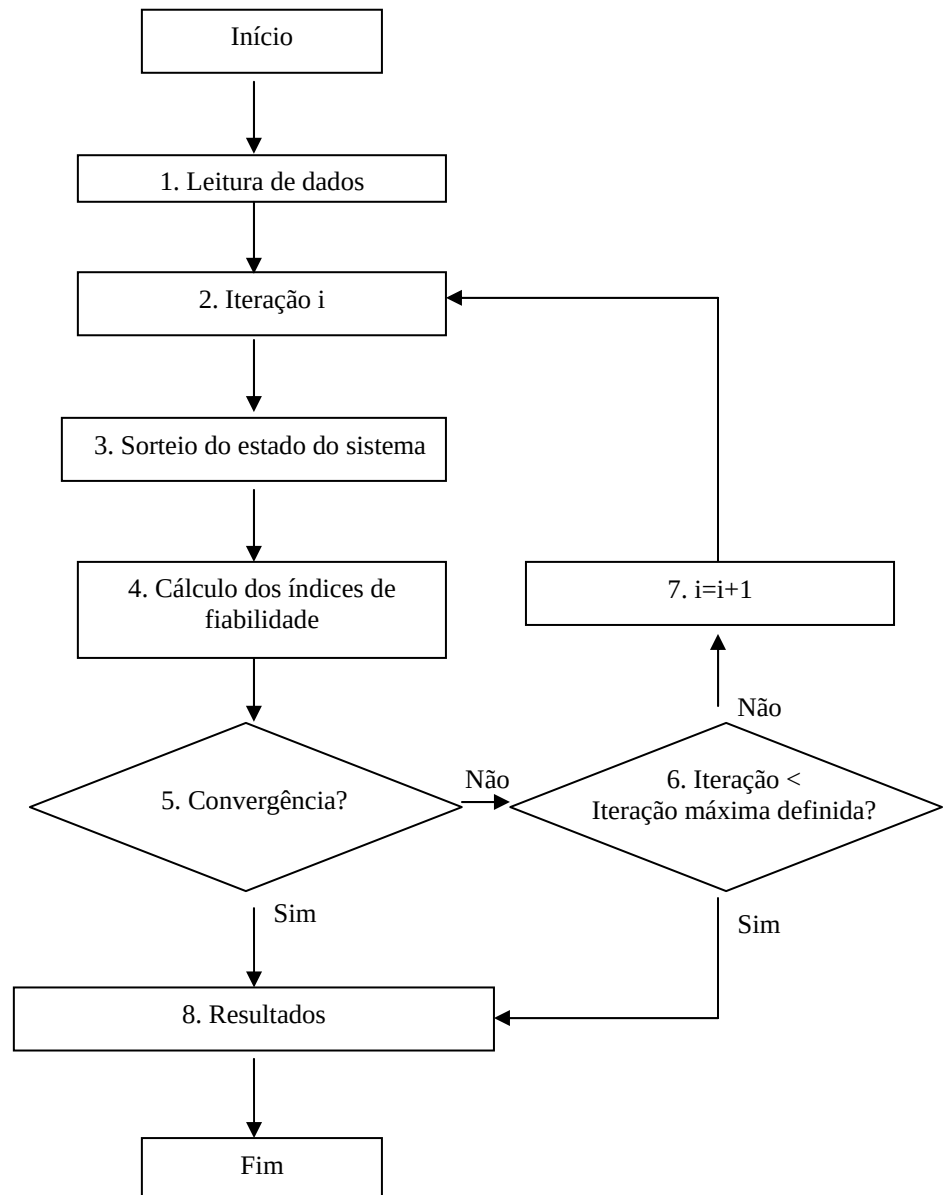


Figura 2.13 - Algoritmo genérico do MMC

Sucintamente, os métodos híbridos combinam técnicas analíticas e de simulação e têm como finalidade a redução dos elevados tempos de simulação associados às versões anteriores. Pormenores sobre estas formulações poderão ser consultados, por exemplo em [Billinton e Wenyuan, 1991a; Pereira et al, 1992; Rios et al, 1999].

A incerteza nas técnicas de simulação identificadas e que caracteriza carga, produção, estados dos componentes, condições atmosféricas, etc, é, como se referiu, tradicionalmente modelizada probabilisticamente [Billinton e Allan, 1988; 1996; Billinton e Li, 1994]. Com a reestruturação do sector eléctrico e perante a dificuldade de obtenção de dados históricos capazes para se poder construir uma distribuição de probabilidade, a incerteza inerente à

avaliação da adequação do SEE pode ser tratada com distribuições de possibilidade. Por exemplo, Saraiva [1992] e Saraiva et al [1995] utilizam distribuições de possibilidade no tratamento de cargas na avaliação da fiabilidade do sistema composto com simulação de Monte Carlo. São sorteados os estados do sistema de acordo com as taxas de saída forçada dos componentes (FOR) que compõem o sistema composto, mas para a carga não há sorteio de estados. A carga é tratada como um todo sendo modelizada com distribuições de possibilidade. São propostos novos índices reflectindo a integração de modelos probabilísticos e conceitos difusos. Também as taxas de reparação e avarias são nestes casos e para o sistema composto, modelizadas a partir da teoria difusa [Saraiva e Sousa, 1998; Miranda 1998].

Também a metodologia proposta neste trabalho e que será apresentada no Capítulo 3 pode ser adaptada de forma a ser integrada em estudos de fiabilidade. Neste caso e considerando apenas os componentes da rede de transporte, cada estado sorteado ou seleccionado pode ser avaliado no que se refere à adequação da rede. Este assunto será discutido no Capítulo 5.

2.7 NOTA ÀS APLICAÇÕES COMERCIAIS PARA AVALIAÇÃO DA FIABILIDADE

As técnicas referidas para selecção de estados na avaliação da fiabilidade do sistema composto têm sido utilizadas com sucesso em aplicações industriais. Em 1972 [Schlumberger et al, 1999], surge na EDF (Electricidade de França) o modelo MÉXICO, modelo de simulação (*Modelé Probabiliste pour l'Etude Globale d'la Sécurité d'Alimentation d'un Reseaux de Transport*) para avaliação da fiabilidade do sistema composto. Este modelo foi substituído pelo modelo METRIS [Eltra, 2003] que é conceptualmente igual ao modelo de simulação MÉXICO, mas adaptado à liberalização do mercado eléctrico. Em Portugal, no final da década de 70 a entidade então responsável pela produção transporte e distribuição de energia, EDP (Electricidade de Portugal), desenvolveu o modelo ZANZIBAR, adaptado do modelo MEXICO. O modelo ZANZIBAR é utilizado pela concessionária da Rede Nacional de Transporte para a realização de estudos de avaliação de fiabilidade no SEE português. Nos EUA e Canadá desde os anos 80, são conhecidos os seguintes programas probabilísticos para avaliação da fiabilidade de SEE [Preston, 1997; Billinton e Wenyuan, 1991b; Beshir et al, 1996; Eltra, 2003]: RECS, SYREL, CREAM, TRELSS e COMREL [Beshir et al, 1996]. O objectivo é avaliar a fiabilidade do sistema composto a partir de índices que se obtêm dos métodos de análise de fiabilidade e na posse dessa informação tomar decisões sobre as hipóteses de expansão mais vantajosas. Em seguida é apenas referido o modelo aplicado em Portugal. Uma breve descrição de outras aplicações comerciais existentes pode ser encontrada no Anexo A.

Modelo ZANZIBAR - Este modelo segue uma metodologia de simulação através do MMC, pelo que efectua um sorteio do conjunto de estados em que o sistema poderá residir. Para estudos de planeamento e para o sistema composto o método avalia o valor esperado da potência de corte de carga e da potência de perdas na rede de transporte. Mais ainda, para cada estado sorteado no método de Monte Carlo é resolvido um problema de fluxo de cargas óptimo (OPF) envolvendo um modelo linear. Neste modelo é realizada uma simulação cronológica dos diagramas de carga de cada subestação, optimização do despacho do parque produtor [Saraiva, 1992]. O resultado do modelo é a determinação de índices de fiabilidade para o sistema composto. Recentemente no âmbito do MIBEL foi acrescentado um módulo ao programa dedicado ao cálculo da capacidade de interligação entre duas áreas [Carola et al, 2005; REN, 2005b].

2.8 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram revistas as principais técnicas baseadas em trânsitos de potência para avaliação da adequação da rede eléctrica. Foi realizado um “cronograma” da evolução dessas técnicas e feito o enquadramento com a evolução do sistema eléctrico. As técnicas existentes não contemplam de forma visível a desejável separação das actividades de produção e transporte sugerida, a nosso ver, pela Directiva 2003/54/EC.

Como se referiu, com a liberalização do sector eléctrico foi abandonada a estrutura verticalizada, onde as actividades de produção, transporte e distribuição de energia constituíam um monopólio. Actualmente estas actividades encontram-se separadas constituindo as actividades de produção e distribuição actividades que tendem a ser mercados e a actividade de transporte, um monopólio. Com a Directiva 2003/54/EC o responsável pela rede de transporte passa a estar obrigado a ter capacidade de longo prazo para satisfazer “pedidos razoáveis de transporte de electricidade”. Com base nesta imposição, deverá o responsável pela rede de transporte (TSO) conhecer até que ponto a sua rede é adequada na satisfação dos tais pedidos “razoáveis de transporte de electricidade”. Na concretização deste objectivo deverá ser abandonada a filosofia clássica de planeamento baseada no sistema composto, promovendo-se a separação do sistema produtor do sistema de transporte (HL2’). As novas metodologias apresentadas [Matos e Gouveia, 2005, 2008; Gouveia e Matos, 2006; 2007; 2008] servem este objectivo proporcionando ao operador de sistema (na língua inglesa, *Transmission System Operator*) uma avaliação separada para o sistema de transporte utilizando apenas informação baseada em preposições de linguagem natural que permitem a modelização dos pedidos de transporte de electricidade.

TRÂNSITO DE POTÊNCIA DIFUSO SIMÉTRICO**3.1 INTRODUÇÃO**

O problema da assimetria nas formulações de trânsito de potências coloca-se ao nível dos modelos tradicionais lineares (DC) e não lineares (AC). Neste capítulo é apresentada uma nova metodologia para os problemas de trânsito de potência que deriva directamente do princípio da extensão [Zadeh, 1965] e não contém os problemas de assimetria das formulações clássicas. Por se tratar de um método que garante a simetria no problema de fluxo de cargas e pelo facto de a incerteza ser modelizada com recurso a números difusos, este tem sido designado por *trânsito de potência difuso simétrico*. A apresentação deste modelo será realizada para o problema completo (AC) e para o problema linear (DC). A formulação utilizada considera processos de optimização onde as restrições dizem respeito às equações dos trânsitos de potência e das potências injectadas nos barramentos. A adição ao problema original das restrições relativas aos limites do trânsito de potências nos ramos resulta num novo problema a que chamaremos de *trânsito de potência difuso constrangido*. Na língua inglesa [Matos e Gouveia, 2005, 2008; Gouveia e Matos, 2006; 2007; 2008] as formulações referidas têm sido designadas, respectivamente por *Symmetric Fuzzy Power Flow* (SFPP) e *Constrained Fuzzy Power Flow* (CFPP). Por uma questão de comodidade sempre que nos referirmos às metodologias no texto serão utilizadas as siglas respectivas na nomenclatura inglesa.

O trânsito de potência difuso simétrico é uma metodologia que pode ser aplicada em sistemas eléctricos em várias situações. Por exemplo:

- Na operação do sistema permitindo a detecção de possíveis congestionamentos e o efeito destes sobre a rede, a detecção da violação dos limites das tensões nos barramentos, o estudo de cenários de operação com incerteza incluindo centrais eólicas, hidroeléctricas, etc.

- Na avaliação da adequação da rede de transporte a médio e longo prazo, sendo possível a simulação de cenários com incerteza e considerando a rede em regime normal ou critérios de segurança normalmente aplicados como o critério (N-1) ou (N-2);
- Na definição de capacidades de recepção de barramentos da rede. Desta forma consegue-se ter uma ideia das potencialidades do sistema no curto e médio prazo, por exemplo na capacidade de recepção de nova produção. Também neste caso considerando, por exemplo as situações simuladas pela REN [2005]: a rede em regime normal e considerando situações de contingência;
- Em estudos de fiabilidade com técnicas probabilísticas permitindo a obtenção de índices (adequação esperada da rede);

Após a apresentação das metodologias serão realizados alguns casos de estudo. Nestes casos será utilizado o SFPP/CFPP para avaliação da adequação da rede de transporte em regime normal (com todos os elementos da rede disponíveis). Outras aplicações da metodologia poderão ser encontradas nos Capítulos 4 e 5. Para teste do SFPP e do CFPP serão utilizadas quatro redes do IEEE: 14, 24, 30 e 118 barramentos. Serão identificadas as capacidades do modelo, assim como os índices para quantificação da adequação da rede de transporte. O SFPP será também comparado com outras metodologias de FPP existentes.

Finalmente, é importante lembrar que as linearizações que são realizadas nas metodologias clássicas de FPP têm como consequência a diminuição da precisão dos resultados. Como se mostrará, no SFPP não será utilizado qualquer processo de linearização.

3.2 CONGESTIONAMENTO E REPRESSÃO

Antes de proceder às apresentações dos modelos para o trânsito de potência difuso simétrico é importante a introdução de alguns assuntos que permitirão maior clareza no entendimento das secções seguintes.

O *congestionamento* de um ramo é uma consequência das limitações físicas ou operacionais da rede. Quando alguma destas é violada obtém-se uma situação de congestionamento. A situação de congestionamento mais usual é a sobrecarga das linhas. A criação dos mercados eléctricos levou a uma alteração do papel da rede. Com efeito, esta passa a ser condicionada por exigências de produtores e consumidores que detêm o direito de livre acesso. A existência de congestionamentos na rede dificulta o livre mercado limitando as transacções comerciais. O operador da rede é o responsável pelo alívio destes congestionamentos.

O CFPF pode ser utilizado para detecção de congestionamentos na rede de transporte. Como se verá (Capítulo 4) poderá também ser usado para ajudar no alívio dos congestionamentos dando indicação dos pontos da rede (reforços) mais adequados para se atingir tal objectivo. Considere-se um trânsito de potência genérico entre os barramentos i e k dado pela distribuição de possibilidade da Figura 3.1 correspondente a um número difuso trapezoidal.

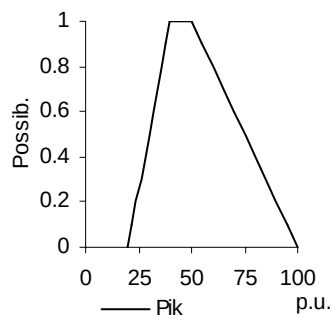


Figura 3.1 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada entre os barramentos i e k

Se no ramo entre os barramentos i e k houver uma limitação de 75 pu, a nova distribuição de possibilidade correspondente a um congestionamento é dada pela Figura 3.2. O congestionamento configura uma situação em que o TP em um ou mais cortes de nível α está no limite do ramo.

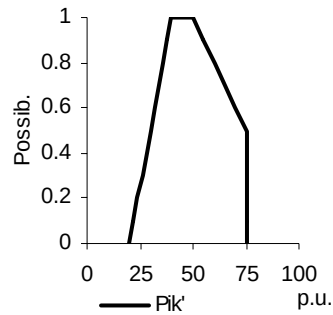


Figura 3.2 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada entre os barramentos i e k sem (Pik) e com (Pik') existência de congestionamento

A Figura 3.3 permite ter uma ideia da dimensão do congestionamento. Neste caso concreto pode dizer-se que o congestionamento ocorre a partir do corte de nível $\alpha=0.5$ mantendo-se até $\alpha=0.0$. Se o ramo não tivesse limite definido, situação irrealista, o TP chegaria até 100 pu (corte $\alpha=0.0$).

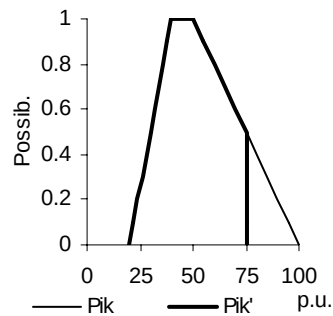


Figura 3.3 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada entre os barramentos i e k com existência de congestionamento

As consequências dos congestionamentos, no âmbito da Directiva 2003/54/CE prendem-se com a limitação da capacidade da rede para satisfação dos “pedidos razoáveis de transporte de electricidade”. Normalmente e em ambiente de mercado, a atenção do operador da rede centra-se no alívio dos congestionamentos [Fang e David, 1999; Kafka, 1999; Raikar e Ilic, 2001; Niimura e Niu, 2002] definindo estratégias de curto e médio prazo e procurando avaliar as consequências económicas dos mesmos. Alguns exemplos serão a alteração da topologia da rede, leilões da capacidade de transporte (atribuição de potência disponível aos licitantes que melhor remunerem o operador do sistema), redespatchos de produção, separação do mercado (segmentação do mercado em várias zonas com preços diferenciados) ou reforço da rede [Paiva, 2007].

A metodologia proposta a seguir centra a questão dos congestionamentos em termos das suas consequências nos pedidos de transporte, concretamente do seu efeito nas potências geradas e consumidas nos barramentos. Sempre que existe uma distribuição de possibilidade especificada para um barramento significa que existirá um pedido de transporte para a rede. Se existe congestionamento, este pedido de transporte está condicionado tendo como consequência a limitação da produção ou carga e claro, consequências económicas. Importa referir que o âmbito deste trabalho se centra na análise das consequências técnicas dos congestionamentos e não nas suas consequências económicas.

Um pedido de transporte que apresente congestionamento pode provocar o que poderemos chamar de *repressão* num ou mais barramentos. Genericamente, a repressão é uma imposição de limite ao que se pretende transportar na rede, seja produção ou carga. Nos modelos clássicos que procuram analisar o efeito dos congestionamentos, em ambiente possibilístico o caso do FOPF (que inclui restrições à capacidade de transporte dos ramos), a preocupação centra-se, por exemplo, com a potência não fornecida. Este tipo de situação refere-se no caso do CFPP, a uma *repressão de carga*. Na Figura 3.4 é ilustrada uma repressão de carga no barramento genérico 3. Neste caso, P3 seria o pedido de carga especificado e P3', o pedido de carga possível de satisfazer pela rede de transporte.

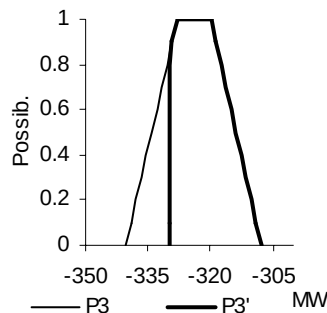


Figura 3.4 – Distribuição de possibilidade para a potência activa de carga no barramento genérico 3

Como os pedidos de transporte são também motivados por produções nos barramentos, podem também ser identificada uma *repressão de produção*. Esta situação é ilustrada na Figura 3.5 para o barramento genérico 7, onde P7 representa a potência de produção especificada e P7' a potência de produção admitida pela rede (consequência de congestionamento). Mais adiante e devidamente integradas nas metodologias serão explicadas as formas de quantificação das repressões.

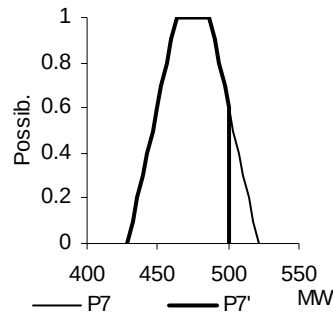


Figura 3.5 – Distribuição de possibilidade para a potência activa de produção no barramento genérico 7

Sempre que ocorre repressão e essa situação não é devida a congestionamentos, está-se perante uma *repressão* básica. Neste caso não é possível satisfazer as especificações das potências. Estas repressões básicas podem ser de produção ou de carga. As metodologias que se propõem neste capítulo permitem a detecção desta situação. Na secção 3.8 é fornecido um exemplo com uma rede de teste.

Os congestionamentos são sem dúvida uma importante informação para o operador da rede. Contudo, a informação que pode ser retida na análise das repressões poderá ser um aspecto muito importante já que oferece a influência directa dos congestionamentos sobre os barramentos. Neste contexto, um outro aspecto interessante é perceber quais os congestionamentos responsáveis pelas repressões em determinados barramentos (que muitas vezes poderão nem sequer ser adjacentes aos ramos congestionados). Esta será uma informação para o operador que, além de identificar os congestionamentos, permite verificar o seu impacto directo sobre os pedidos de transporte.

3.3 TRÂNSITO DE POTÊNCIA DC DIFUSO SIMÉTRICO (DC SFPF)

De acordo com a Directiva 2003/54/CE, o planeamento do sistema de transporte deverá ser conduzido numa perspectiva de longo prazo de forma a “satisfazer pedidos razoáveis de transporte de electricidade”. Desta forma, o assunto do barramento de compensação ganha mais importância uma vez que todos os barramentos devem ser iguais no sentido de terem definida a sua própria distribuição de possibilidade de produção e/ou carga. De facto, a situação de assimetria existente nas formulações tradicionais terá como consequência resultados nas variáveis de saída (potências injectadas, trânsitos de potência, perdas, etc) que poderão por vezes ser irrealistas, como por exemplo distribuições de possibilidade para geradores com valores acima dos seus limites. Este tipo de resultados conduzirá a avaliações incorrectas da adequação da rede com consequências ao nível de todos os agentes que a integram (consumidores, produtores, operadores, etc). Na secção 3.3.1 é dado um pequeno exemplo comparando as versões clássicas com o SFPF.

A formulação correcta do FPF deriva directamente do princípio da extensão [Zadeh, 1965]. Ou seja, corresponde a resolver problemas de optimização para determinar o valor máximo e mínimo da variável difusa para cada corte de nível α [Matos e Gouveia, 2008]. Neste modelo é considerado que para todos os barramentos há especificações das potências injectadas sob a forma de distribuições de possibilidade.

Para o modelo DC de trânsito de potências o valor da potência activa máxima no ramo k será dado por (3.1):

$$\begin{aligned}
 \max \quad & \tilde{P}_k(\alpha) = \tilde{P}_k^{\max}(\alpha) = \sum_{i \neq REF} A_{ki} \cdot P_i \\
 \text{st:} \quad & P_i \leq P_{i\max}(\alpha) \quad i = \text{número de barramentos} \\
 & P_i \geq P_{i\min}(\alpha) \\
 & \sum_i P_i = 0
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

onde $P_{i\min}$ e $P_{i\max}$ correspondem ao intervalo de nível α para a potência activa injectada $\tilde{P}_i$, A_{ki} representa a matriz de sensibilidades do modelo determinístico DC de fluxo de cargas e REF representa o barramento de referência dos argumentos das tensões. Para se obter o valor mínimo da potência activa $\tilde{P}_k^{\min}(\alpha)$ bastará resolver (3.1) minimizando a função objectivo. O

conjunto dos resultados (máximo e mínimo) obtidos define completamente o resultado para o corte de nível α considerado. Para cada ramo, terão de ser resolvidos dois problemas de optimização por cada corte de nível α considerado.

O cálculo (max/min) para cada um dos cortes de nível α desejados no intervalo $[0, 1]$ permite a construção da distribuição de possibilidade completa para cada trânsito de potência a calcular. Este modelo requer a resolução de um número considerável de problemas de optimização linear. No entanto, possui a vantagem de ser completamente simétrico relativamente aos barramentos. Mais adiante, após a apresentação do modelo DC de trânsito de potências difuso constrangido será enunciada uma técnica baseada em procedimentos de pós-optimização que permite nos modelos lineares limitar o número de problemas a resolver. O SFPP além de calcular o trânsito de potências nos ramos pode ser utilizado para verificar se as potências injectadas desejadas (especificadas) de produção ou carga são ou não possíveis (3.2). São estas potências que motivam os “pedidos razoáveis de transporte de electricidade”.

$$\begin{aligned}
 \max \quad & \tilde{P}_i^{final}(\alpha) \\
 \text{st:} \quad & P_i \leq P_{i\max}(\alpha) \quad i=\text{número de barramentos} \\
 & P_i \geq P_{i\min}(\alpha) \\
 & \sum_i P_i = 0
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

A aplicação do SFPP permite determinar quais os trânsitos de potência (3.1) e potências injectadas (3.2) permitidas, evitando situações de resultados não viáveis como sucede com os modelos tradicionais. Ou seja, o método permite verificar para uma dada rede de transporte se as distribuições de possibilidade previstas (pedidos de transporte) poderão ou não ser possíveis. Em caso de esses pedidos não puderem ser completamente satisfeitos, pode-se concluir que existe um problema da rede na satisfação das potências injectadas especificadas para os barramentos. A não satisfação total das potências especificadas será (SFPP), como se disse, denominada por *repressão básica*. Por agora identifica-se apenas a existência desta capacidade do modelo sendo este assunto explorado com alguns exemplos mais adiante em secção própria.

Uma particularidade deste modelo é que a escolha do barramento de referência das fases não influencia os resultados como acontece nas formulações tradicionais.

O modelo pode também ser utilizado para calcular os argumentos das tensões bastando para esse efeito substituir na função objectivo (3.2), a potência injectada pelo argumento:

$$\begin{aligned}
 &\max \quad \tilde{\theta}_i(\alpha) \\
 &\text{st:} \quad P_i \leq P_{i\max}(\alpha) \quad i=\text{número de barramentos} \quad (3.3) \\
 &\quad \quad P_i \geq P_{i\min}(\alpha) \\
 &\quad \quad \sum_i P_i = 0
 \end{aligned}$$

3.3.1 Exemplo ilustrativo comparando versões clássicas do FPF com o SFPP

Com a finalidade enunciada, utiliza-se a pequena rede de 3 barramentos da Figura 3.6 sendo a produção e a carga dada por números difusos trapezoidais e com reactância dos ramos igual a $j \ 1.0 \text{ pu}$.

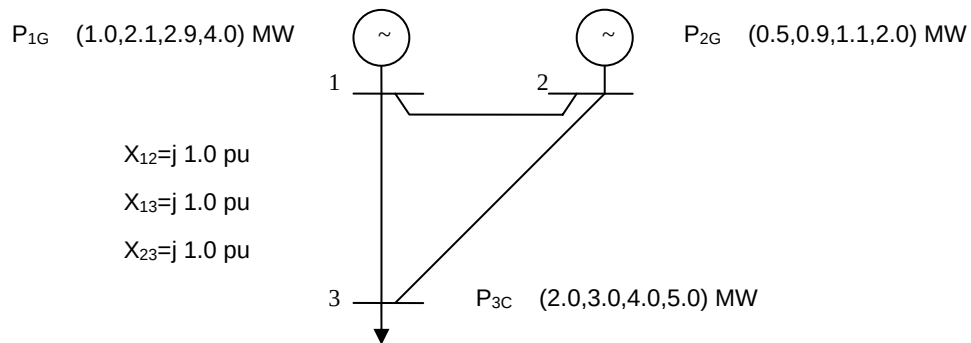


Figura 3.6 – rede de teste de 3 barramentos, 3 ramos - adaptado de [Saraiva, 1992]

Neste caso são comparados três modelos de FPF (DC): a primeira formulação do FPF [Miranda e Matos, 1989a], a formulação que inclui procedimentos de correcção para o barramento de compensação [Saraiva et al, 1991] e o SFPP [Matos e Gouveia, 2005; 2008]. Nas Figuras 3.7 a 3.10 estes modelos estão identificados por “First”, “Cons” e “Sym” respectivamente. Foi escolhido o barramento 1 para referência. No modelo “Cons” foram considerados os limites do gerador 1 em [1; 4] MW.

No caso do SFPP apenas são permitidos trânsitos de potência viáveis. Na formulação

tradicional, o trânsito de potência cresce artificialmente aumentando a incerteza (Figura 3.7). Na formulação com limites nos geradores esta incerteza é reduzida parcialmente pela inclusão de distribuições rectangulares na barra de referência, apresentando os mesmos resultados que o SFPF para o corte $\alpha=0$. Contudo, esta situação apenas acontece se a especificação da potência gerada no modelo “Sym” coincidir com os limites de produção especificados no modelo “Cons”. Para cortes de nível superiores verifica-se a existência de incerteza artificial nos trânsitos de potência que se irá reflectir na potência gerada no barramento de referência.

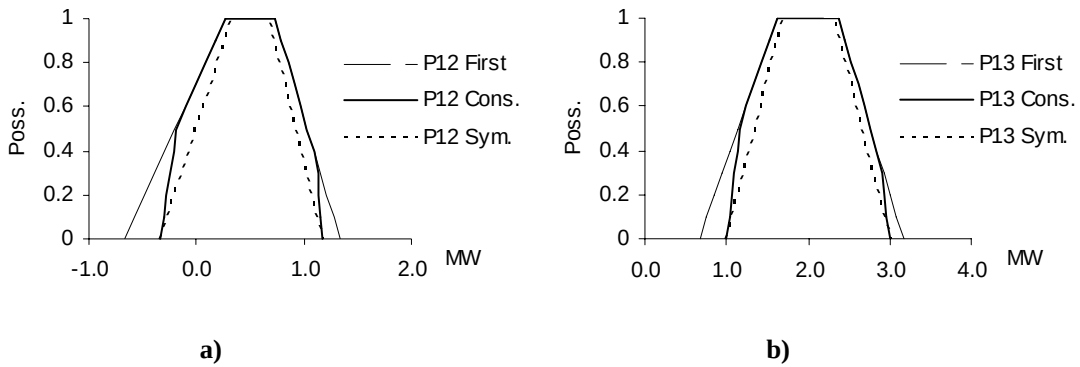


Figura 3.7 – Distribuição de possibilidade para trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 1-3 (b)

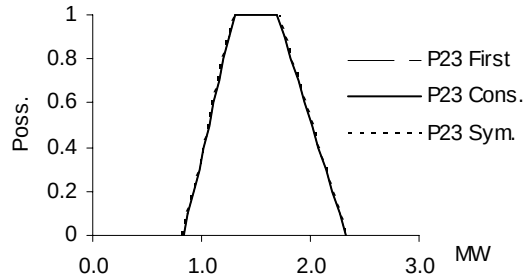


Figura 3.8 – Distribuição de possibilidade para trânsito de potência activa no ramo 2-3

Um aspecto que tem sido referido é o facto do SFPF oferecer sempre os mesmos resultados independentemente da escolha da barra de referência. Este aspecto tem que ver com a natureza da metodologia que considera a incerteza distribuída por todos os barramentos, sem excepção. Como consequência, não vai haver acumulação da incerteza proveniente dos restantes barramentos (mais as perdas para o modelo AC) num barramento específico (barramento de referência), como sucede com as formulações do trânsito de potência determinístico ou com as formulações clássicas do FPF. O exemplo seguinte continua a considerar as distribuições trapezoidais e a rede da Figura 3.6, com a diferença de se escolher

o barramento 2 como de referência. No modelo “Cons” foram considerados os limites do gerador 2 em [0.5; 2.0] MW.

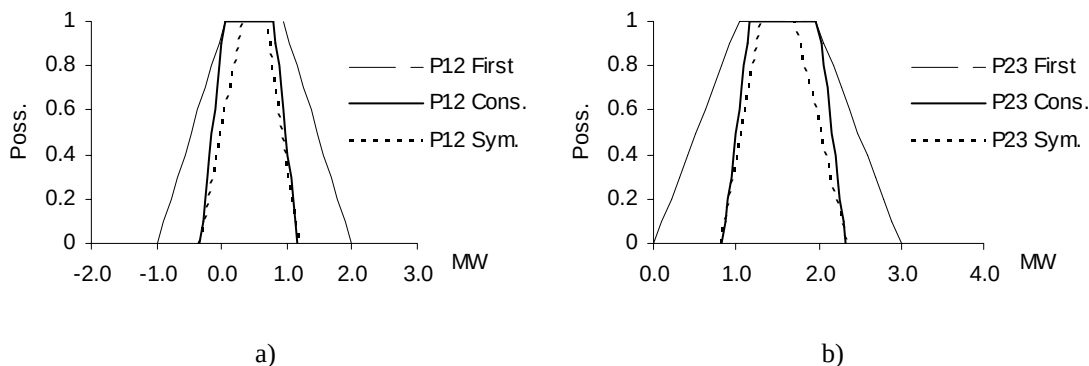


Figura 3.9 – Distribuição de possibilidade para trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 2-3 (b)

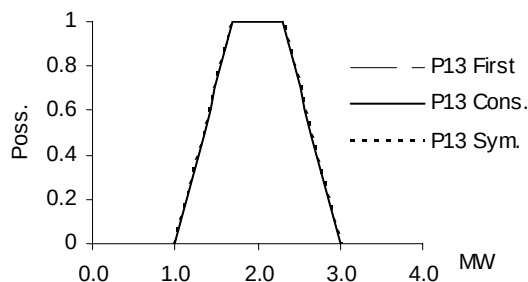


Figura 3.10 – Distribuição de possibilidade para trânsito de potência activa no ramo 1-3

Como se pode verificar (Figura 3.9) as formulações “First” e “Const” apresentam globalmente resultados diferentes em função do barramento de referência escolhido. No SFPP, como se queria mostrar não existe alteração dos resultados devido à escolha do barramento de referência. Apenas no caso particular da especificação ser rectangular para qualquer barramento de referência candidato, ao nível do corte $\alpha=0$, a alteração da barra de referência não afecta os resultados.

Os exemplos dados fizeram uso de uma rede de 3 barramentos para o modelo linear, portanto sem consideração de perdas. Com o aumento do número de barramentos, os problemas identificados terão tendência para se agravar.

3.4 TRÂNSITO DE POTÊNCIA DC DIFUSO CONSTANGIDO (DC CFPP)

A aplicação do SFPF para a avaliação da adequação da rede de transporte conduz à integração das restrições relativas ao limite de capacidade de transporte no problema original (3.1). O CFPP representa o estudo do problema de trânsito de potências difuso simétrico com imposições à capacidade de transporte (limites dos ramos).

Como se verá, a aplicação de limites nos ramos define o principal interesse do modelo (3.1) e (3.2), possibilitando o estudo da adequação da rede. Neste caso o modelo anterior (3.1) para o SFPF é transformado no CFPP (3.4):

$$\begin{aligned}
 \max \quad & \tilde{P}_k(\alpha) = \tilde{P}_k^{\max}(\alpha) = \sum_{i \neq REF} A_{ki} \cdot P_i \\
 \text{st:} \quad & P_i \leq P_{i\max}(\alpha) \quad i = \text{número de barramentos} \\
 & P_i \geq P_{i\min}(\alpha) \\
 & \sum_i P_i = 0 \\
 & A.P \leq P_{LIM} \\
 & -A.P \leq P_{LIM}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Neste modelo, A representa a matriz de sensibilidades, P representa o vector de P_i e P_{LIM} representa a máxima potência activa permitida no ramo (capacidade de transporte) que tanto se poderá verificar de um barramento i para um barramento k , como em sentido inverso.

De referir que, como resultados, apenas serão disponibilizados fluxos de carga viáveis, pelo que situações onde possam ocorrer congestionamentos nos ramos serão identificadas de imediato. A situação de congestionamentos representa uma informação importante para o operador do sistema. No entanto, o real interesse da metodologia vem com a avaliação da adequação da rede relativamente à satisfação das potências injectadas especificadas para os barramentos. Assim, além de permitir identificar congestionamentos nos ramos, o modelo pode ser utilizado para verificar se os pedidos de transporte de electricidade (sejam de produção ou de carga) podem ou não ser satisfeitos. Desta forma, pode definir-se (3.5):

$$\begin{aligned}
& \max \quad \tilde{P}_i^{final}(\alpha) \\
& \text{st:} \quad P_i \leq P_{i\max}(\alpha) \quad i=\text{número de barramentos} \quad (3.5) \\
& \quad \quad P_i \geq P_{i\min}(\alpha) \\
& \quad \quad \sum_i P_i = 0 \\
& \quad \quad A.P \leq P_{LIM} \\
& \quad \quad -A.P \leq P_{LIM}
\end{aligned}$$

Os valores de $\tilde{P}_i^{final}$ definem para cada barramento estudado a verdadeira potência injectada permitida pela rede de transporte nas condições actuais. Se $\tilde{P}_i^{final} \neq \tilde{P}_i$ (onde $\tilde{P}_i$ é a potência injectada prevista modelizada com recurso a números difusos) pode concluir-se que a rede de transporte não é completamente adequada, já que a produção (ou a carga) está reprimida. A seguir serão definidas formas de quantificar as repressões. Tal como definido em (3.3) também no caso do CFPF se pode calcular o argumento das tensões substituindo na função objectivo, a potência injectada em (3.5) por $\tilde{\theta}_i(\alpha)$.

O ponto onde ocorre a repressão nos modelos lineares pode ser obtido recorrendo a técnicas de programação paramétrica [Jeter, 1986; Greenberg e Gal, 1997]. Esta é uma técnica muito utilizada na análise de sensibilidade em investigação operacional e fornece indicação das variações na solução óptima perante algumas alterações no comportamento de variáveis do problema.

No caso de se variarem os termos independentes das restrições, o problema linear de programação paramétrica pode ser dado por (3.6) onde μ é um parâmetro que varia linearmente e relativamente ao qual se pretende obter a solução óptima.

$$\begin{aligned}
& \min Z = c X \\
& \text{st : } A X = b + \mu b' \quad (3.6) \\
& \quad x \geq 0
\end{aligned}$$

Com esta formulação é possível conhecer o intervalo de valores para os elementos do termo independente (b) que mantém a base óptima do problema. A base óptima irá manter-se enquanto se verificar a admissibilidade da solução associada. Consegue-se desta forma identificar as variações possíveis do parâmetro μ $[\mu_{\min}, \mu_{\max}]$ e a base óptima e admissível associada a cada variação. Se a variação do parâmetro for inferior a $\mu_{\min}$ ou superior a $\mu_{\max}$ a solução poderá ser óptima mas não admissível. A não admissibilidade pode ser ultrapassada utilizando o algoritmo Simplex dual obtendo-se uma nova solução óptima e admissível. Sobre a nova solução poderão ser obtidos os novos intervalos de μ .

No caso do SFPF os termos independentes são os limites das potências injectadas (3.1–3.3), no caso do CFPF incluem-se também os limites de capacidade de transporte dos ramos (3.4–3.5). A aplicação de programação paramétrica ao CFPF permite verificar a partir de que ponto existe alteração das variáveis básicas do problema dando uma indicação clara do local onde começa a repressão. Esta informação indica ao utilizador as variações possíveis na função objectivo sem alteração das variáveis básicas da solução. Por exemplo, na Figura 3.11 verifica-se uma repressão no corte de nível $\alpha=0$, que se mantém até $\alpha=0.5$, onde ocorre mudança de base. A nova base mantém-se até ao corte de nível $\alpha=1$.

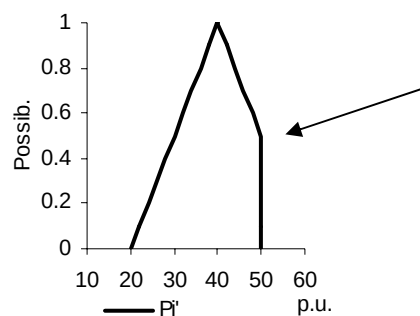


Figura 3.11 – Distribuição de possibilidade com repressão para um barramento genérico i

A utilização de parametrização nos termos independentes é um aspecto importante a considerar já que permite a identificação de pontos singulares nas funções. Este processo, devidamente integrado, evita no CFPF que tenha de ser resolver para o problema (3.5) vários cortes de nível α até encontrar o ponto singular (identificado pela seta na Figura 3.11) que corresponde à mudança de base. Consegue-se desta forma a diminuição dos tempos envolvidos na simulação e indicação do valor exacto onde a mudança de base ocorre. No CFPF (3.5) o ponto singular é normalmente aproximado estando esta aproximação

dependente dos intervalos escolhidos para o corte de nível α . A integração deste assunto no CFPF não constitui âmbito da dissertação no entanto é fornecido um pequeno exemplo na secção 3.7.1.

Estes modelos, DC SFPF e DC CFPF, podem ser resolvidos por recurso a métodos de programação linear existindo um vasto conjunto de aplicações comerciais das quais se destacam o LINDO, POM para Windows, Prolin, Solver do Excel ou Matlab.

3.5 TRÂNSITO DE POTÊNCIA AC DIFUSO SIMÉTRICO (AC SFPP)

Embora a formulação para o modelo DC permita encontrar resultados importantes sobre a rede, uma análise mais cuidadosa (completa) deve utilizar o modelo AC. Assim, de forma a estender o modelo ao caso AC, as equações padrão são incluídas como restrições juntamente com os limites de α para cada variável. O valor máximo para cada corte de nível de α estudado de cada variável será dado pelo problema de otimização não linear (3.7):

$$\begin{aligned}
 \max \quad & \tilde{Z}(\alpha) \\
 \text{st:} \quad & P_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) && \text{todos os barramentos } i \\
 & Q_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) && \text{todos os barramentos } i \\
 & P_i \leq P_{i \max}(\alpha) && \text{todos os barramentos } i \\
 & P_i \geq P_{i \min}(\alpha) && \text{todos os barramentos } i \\
 & Q_i \leq Q_{i \max}(\alpha) && \text{todos os barramentos } i \\
 & Q_i \geq Q_{i \min}(\alpha) && \text{todos os barramentos } i \\
 & V_i = V_i^{SP} && \text{barramentos PV e REF} \\
 & \theta_i = 0 && \text{barramento REF}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Onde G_{ik} e B_{ik} são, respectivamente, a parte real e imaginária dos elementos da matriz das admitâncias nodais, onde $P_{i \min}$ e $P_{i \max}$ têm o significado habitual e $Q_{i \min}$ e $Q_{i \max}$ correspondem ao intervalo de nível α para a potência reactiva injectada $\tilde{Q}_i$. A variável Z poderá representar:

- qualquer das tensões nos barramentos PQ (V_i);
- o argumento das tensões no barramento i (θ_i);
- qualquer fluxo de carga entre os barramentos i e k (P_{ik} , Q_{ik} , S_{ik});
- a potência injectada no barramento i (P_i , Q_i , S_i);

- as perdas num qualquer ramo ou em todo o sistema (P_{ik}^{perdas} , Q_{ik}^{perdas} , S_{ik}^{perdas}).

O que se pretende é verificar quais são os trânsitos de potência determinísticos permitidos na rede em função das especificações das potências e das especificações das tensões, de forma a encontrar o máximo valor da variável Z para cada corte de nível α . Para se encontrar o mínimo valor desta variável, a função objectivo será a minimizar em lugar de maximizar. Tal como anteriormente no modelo DC, os valores obtidos para Z na situação de maximização e minimização irão definir completamente o resultado para o corte de nível α .

O resultado do SFPF, independentemente da variável Z escolhida será uma distribuição de possibilidade. De facto, as variáveis de entrada do problema correspondem a especificações de potência modelizadas por distribuições deste tipo. A resolução (max/min) de (3.7) permite em cada corte α a obtenção de dois valores que são função dos valores especificados e da configuração da rede. A agregação dos valores obtidos em todos os cortes define o número difuso final $\tilde{Z}$. A Figura 3.12 mostra dois exemplos para as variáveis de estado, tensão e seu argumento num barramento genérico i .

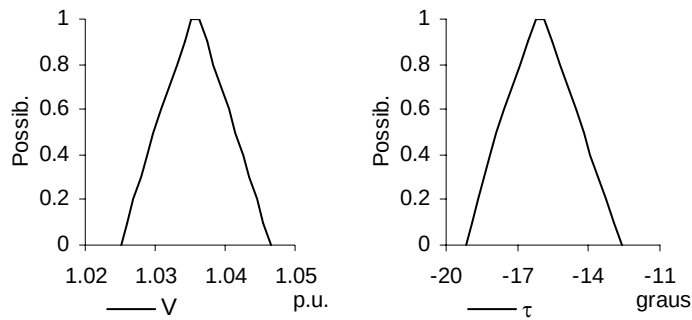


Figura 3.12 – distribuição de possibilidade para a fase e argumento da tensão num barramento genérico i

Em resumo, o AC SFPF é um modelo completamente simétrico uma vez que a incerteza não se concentra especificamente num determinado barramento (que nas versões clássicas é o barramento de compensação). É definida uma distribuição de possibilidade para todos os barramentos em lugar de se definirem apenas os limites dos geradores. A salientar também que neste modelo (tal como nas formulações clássicas) terá de existir um barramento de referência dos argumentos das tensões (3.7). Mas o barramento que pode assumir este papel poderá ser qualquer um (PV ou PQ). Finalmente, trata-se de um modelo que permite avaliar a rede de transporte de forma independente.

3.6 TRÂNSITO DE POTÊNCIA AC DIFUSO CONSTRANGIDO (AC CFPF)

O AC SFPF pode ser utilizado para verificar da existência de congestionamentos na rede de transporte, o que constitui uma informação importante da rede. No entanto, mais interessante é a possibilidade de incluir as restrições relativas à capacidade de transporte nos ramos da RT (e limites das tensões nos barramentos PQ) de forma a avaliar eventuais repressões que possam surgir nas potências injectadas nos barramentos. O modelo definido para o AC SFPF (3.7) é transformado no AC CFPF (3.8):

$$\begin{aligned}
 &\max \quad \tilde{Z}(\alpha) \\
 &\text{st:} \quad P_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad \text{todos os barramentos } i \\
 &\quad Q_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad \text{todos os barramentos } i \\
 &\quad P_i \leq P_{i\max}(\alpha) \quad \text{todos os barramentos } i \quad (3.8) \\
 &\quad P_i \geq P_{i\min}(\alpha) \quad \text{todos os barramentos } i \\
 &\quad Q_i \leq Q_{i\max}(\alpha) \quad \text{todos os barramentos } i \\
 &\quad Q_i \geq Q_{i\min}(\alpha) \quad \text{todos os barramentos } i \\
 &\quad V_i = V_i^{SP} \quad \text{barramentos PV e REF} \\
 &\quad \theta_i = 0 \\
 &\quad |S_{ik}| \leq S_{ik}^{\max} \quad \text{todos os ramos } i-k
 \end{aligned}$$

onde $S_{ik}^{\max}$ representa o limite da potência aparente de um ramo entre o barramento i e o barramento k . A variável Z tem o significado referido no AC SFPF.

Além das restrições físicas relativas aos limites dos ramos, se desejado, a inclusão de limites operacionais é também possível nos modelos (3.7-3.8). Para este efeito, as inequações seguintes (3.9) deverão ser incluídas como restrições:

$$\begin{aligned} V_i &\leq V_{i\max} \\ V_i &\geq V_{i\min} \end{aligned} \quad \text{barramentos PQ} \quad (3.9)$$

Desta forma além da identificação de situações de congestionamento nos ramos, é também possível a identificação de barramentos funcionando, para determinados valores de possibilidade, no seu limite operacional. A Figura 3.13 ilustra este caso para um barramento genérico i cujo limite operacional é de cerca de 1.041 pu e onde V_i e V_i' representariam respectivamente, a não inclusão ou inclusão de restrições operacionais (3.9) no modelo geral (3.8).

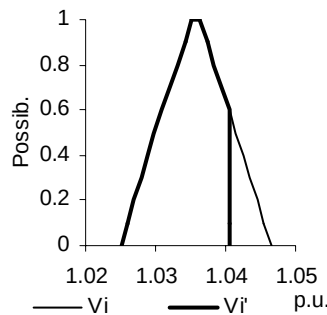


Figura 3.13 – Distribuição de possibilidade para a amplitude tensão no barramento genérico i

O SFPF e CFPP são problemas de otimização não linear existindo comercialmente várias aplicações para a sua resolução como o LINGO ou o Matlab (*toolbox* de otimização). Dada a sua natureza não linear (envolvendo dois problemas vezes o número de variáveis para cada nível α a considerar) os tempos de simulação utilizados na obtenção dos mínimos e máximos (extremos) da função objectivo Z , podem ser consideráveis. Esta situação é uma desvantagem mas não representa um problema já que a metodologia se aplica à avaliação da rede a médio ou longo prazo (regime permanente). No entanto, justificará que se realize trabalho futuro com vista a reduzir os tempos totais de execução, obtendo vantagens por exemplo do facto das restrições serem as mesmas para todos os problemas de otimização. A utilização de processamento paralelo é também possível.

Foi estudado um conjunto de redes (IEEE 14, 30, 118 barramentos) e estimado numa base relativa, o tempo de simulação associado a cada uma em função da sua dimensão quando se utilizam o AC SFPF e o AC CFPP. Como esperado (Figura 3.14), o tempo de simulação

crece com a dimensão da rede e é maior no caso do CFPF devido à inclusão das restrições relativas aos ramos. Foi utilizado um computador Pentium M 1.4 GHz. Para redes com grandes limitações à capacidade de transporte o tempo de simulação tende a crescer.

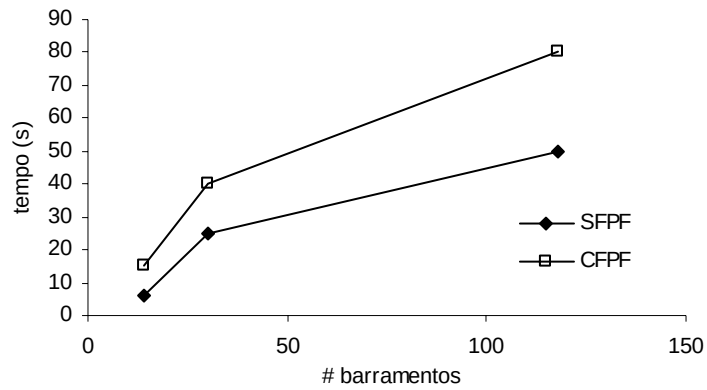


Figura 3.14 - Tempos de simulação médios para redes com diferentes dimensões

3.7 QUANTIFICAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DA REDE DE TRANSPORTE

No caso determinístico, uma dada configuração da rede pode ser viável ou inviável, dependendo se são ou não satisfeitos os limites técnicos (e operacionais se existirem) associados às restrições do problema. Assim, se é pretendido determinar o grau de violação das restrições, o resultado será 1 (existe violação) ou 0 (não existe violação). No FPF poderá este grau ser definido como uma distribuição de possibilidade. No âmbito de problemas de planeamento em ambiente difuso, foram definidos [Miranda e Saraiva, 1992; Matos e Ponce de Leão, 1995] índices (*robustez* e *severidade*) para avaliar alternativas de expansão no que se refere a eventuais violações. O índice de robustez refere-se ao máximo valor de possibilidade para o qual o sistema concede acomodar toda a incerteza. O índice de severidade quantifica a gravidade com que um determinado limite é ultrapassado. Ponce de Leão e Matos [1995; 1997] definem este índice associado ao cálculo dos limites térmicos e à queda de tensão máxima admissível.

No trânsito de potência simétrico, a satisfação dos pedidos de transporte de electricidade pode também ser avaliada por meio de índices semelhantes aos referidos, mas neste caso destinados a quantificar as repressões produzidas pelos limites técnicos (e operacionais) da rede de transporte. Tais índices permitem verificar a adequação da rede. No caso das formulações apresentadas neste capítulo, a adequação refere-se exclusivamente à capacidade da rede de transporte para satisfazer os pedidos de transporte de electricidade, considerando que esses pedidos são modelizados por conjuntos difusos e são independentes.

De facto, poderão não ser permitidos todos os cenários de transporte desejados associados aos vários cortes de nível α . Esta situação terá consequências nas potências injectadas especificadas nos barramentos criando uma situação de inadequação da rede. Ou seja, é limitada a produção ou procura de electricidade havendo constrangimento no funcionamento do mercado. Estes constrangimentos correspondem a repressões nos barramentos (Figura 3.4).

Com a finalidade de quantificar a adequação da rede de transporte são apresentados [Matos e Gouveia, 2005] em seguida índices de repressão. Estes são inspirados nos índices definidos anteriormente para calcular o grau de violação das restrições [Miranda e Saraiva, 1992; Ponce de Leão e Matos, 1995; 1997] em estudos de planeamento.

Grau de Repressão - valor mínimo de α para o qual não ocorre qualquer repressão em qualquer barramento. No caso AC além das potências activas injectadas poderão também de ser avaliadas as repressões nas potências reactivas injectadas.

Severidade individual de repressão – corresponde à área relativa à injeção de potência difusa que não pode ser satisfeita. Esta área corresponde à *repressão* existente. Este índice é expresso em MW para o modelo DC CFPF e em MW/Mvar para o modelo AC CFPF contemplando as injeções de potência activa e reactiva. A severidade individual de repressão (SR) num barramento i (área “A”, Figura 3.15) pode ser calculada por (3.10) onde P_{ip} corresponde á máxima potência permitida nas condições actuais da rede.

$$SR_i = \int_{P_{ip}}^{\infty} \alpha(P_i) dP_i \quad (3.10)$$

Na Figura 3.15, P_i representa a potência activa injectada especificada e P_i' a potência activa injectada calculada permitida. O grau de repressão é de 0.42 e P_{ip} apresenta um valor de 50 pu. A severidade de repressão corresponde à área A.

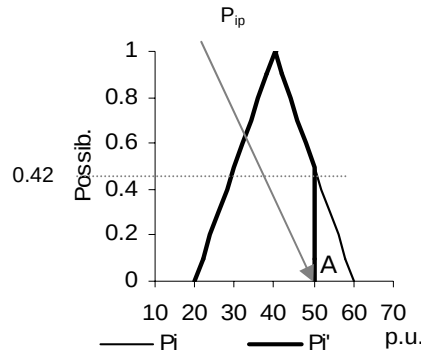


Figura 3.15 – Distribuições de possibilidade para a potência activa especificada (P_i) e para a potência activa reprimida (P_i') ou permitida

Os indicadores individuais referidos podem ser agregados permitindo a obtenção de índices globais. No caso do grau de repressão (GR) o pior caso corresponde ao barramento i que apresenta maior valor mínimo de α para o qual não ocorre repressão (3.11).

$$GR = \min GR_i \quad (3.11)$$

O somatório da severidade individual de repressão em todos os nb barramentos, permite encontrar a *severidade global de repressão* (3.12).

$$SGR = \sum_{i=1}^{nb} SR_i \quad (3.12)$$

A severidade individual de repressão permite em estudos de planeamento identificar os barramentos que mais contribuem para a severidade global de repressão e em seguida actuar sobre os ramos (reforço) potencialmente responsáveis por essas repressões. Esse será um assunto a tratar no Capítulo 4.

3.7.1 Um pequeno exemplo para o SFPE/CFPF

Com a finalidade de ilustrar o tipo de resultados fornecidos pela metodologia apresenta-se em seguida, a pequena rede de 3 barramentos da Figura 3.6, com alterações nos valores das potências especificadas. Neste caso, a produção e carga são modelizadas com recurso a números difusos triangulares (Figura 3.16).

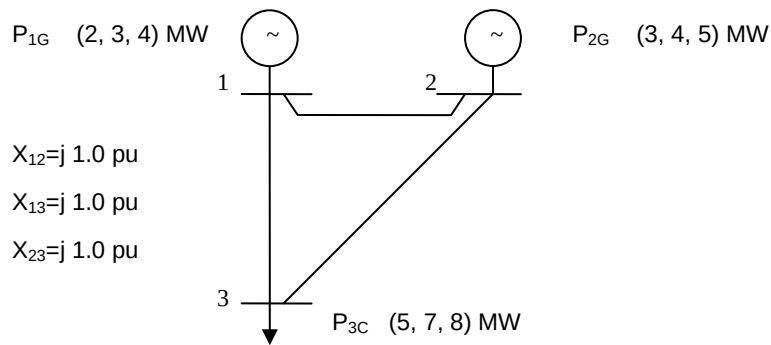


Figura 3.16 – rede de 3 barramentos

A partir do DC SFPE (3.1) e resolvendo o problema (maximizando e minimizando) de forma a obter os resultados completos por corte de nível α são obtidos os trânsitos de potência difusos ($\tilde{P}_{ik}$) para os ramos 1-2, 1-3 e 2-3 (Figura 3.17). Este procedimento tem por finalidade a obtenção dos valores de referência para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência nos ramos uma vez que estes valores inicialmente não são conhecidos como sucede com as potências injectadas nos barramentos.

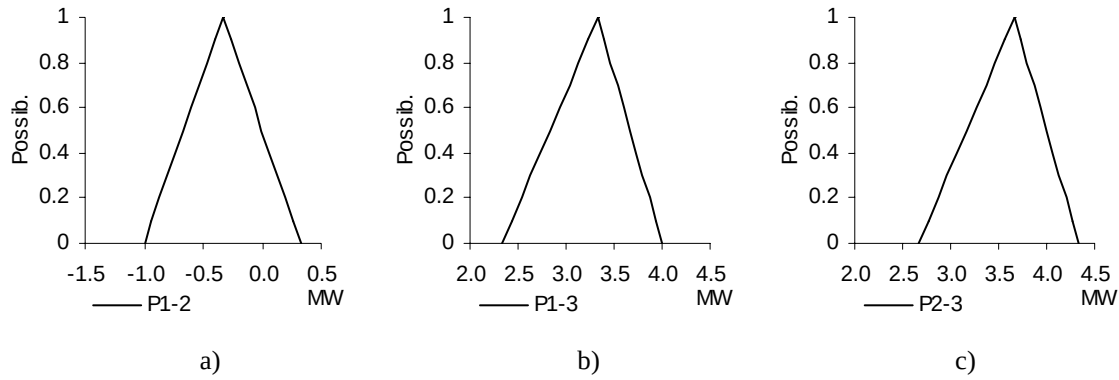


Figura 3.17 – Trânsito de potências difuso para o ramo 1-2 (a), ramo 1-3 (b) e ramo 2-3 (c)

Considerado um limite à capacidade de transporte de 3.8 MW para o ramo 2-3 são obtidos por aplicação do DC CFPF (3.4), os novos os fluxos de carga difusos (P_{ik}'), conforme Figura 3.18. A Figura 3.19 aglutina os resultados das Figuras 3.17 e 3.18

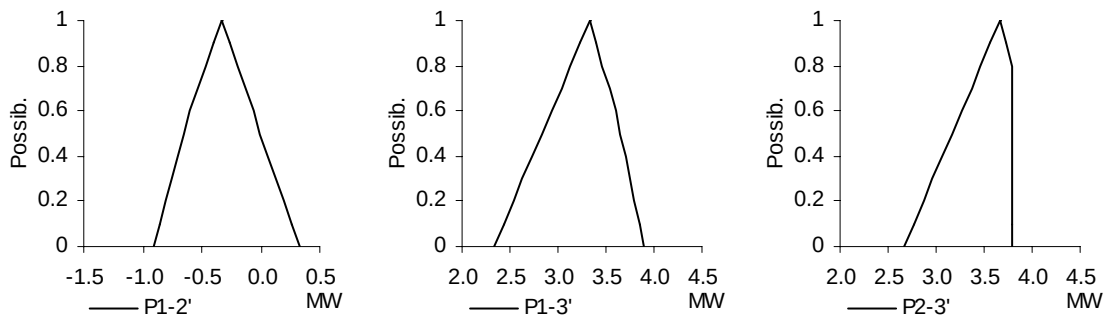


Figura 3.18 – Trânsito de potências difuso para o ramo 1-2 (a), o ramo 1-3 (b) e o ramo 2-3 (c) para o ramo 2-3 limitado em 3.8 pu

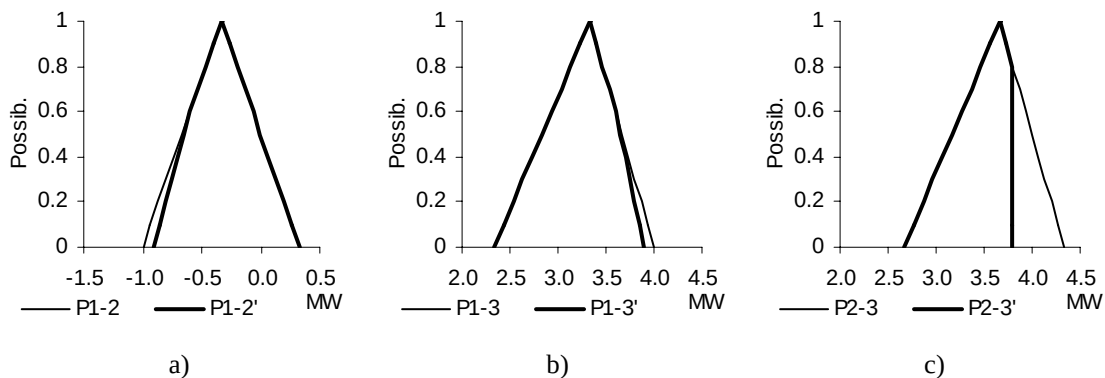


Figura 3.19 – Trânsito de potências difuso para o ramo 1-2 (a), o ramo 1-3 (b) e o ramo 2-3 (c) com (P_{i-k}') e sem (P_{i-k}) limitação do ramo 2-3

Como se pode constatar pela análise da Figura 3.19, o limite de 3.8 MW afecta além do ramo 2-3, os restantes ramos 1-2 e 1-3. Pode-se assim constatar que o congestionamento existente no ramo 2-3 influencia os restantes ramos.

Em seguida, utilizando o DC CFPP (3.5) obtém-se a consequência do congestionamento de 2-3 sobre as potências activas injectadas. P_i e P_i' têm o significado habitual. Como se pode verificar, o barramento 1 não é afectado, mas no barramento 2 observa-se uma repressão da produção e no barramento 3 uma repressão da carga. Ou seja, não existem trânsitos de potência viáveis que permitam a aceitação completa da produção no barramento 1 assim como o fornecimento total da carga no barramento 3.

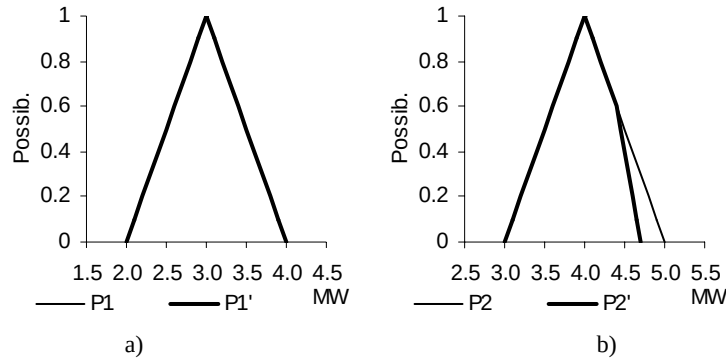


Figura 3.20 – Potência activa injectada difusa para o barramento 1(a) e barramento 2 (b)

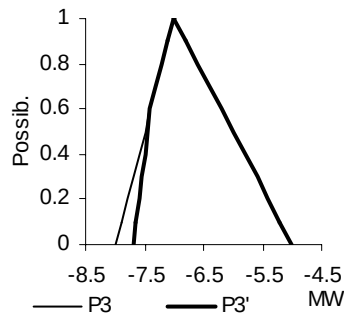


Figura 3.21 – Potência activa injectada difusa para o barramento 3

Na formulação clássica do FPF [Miranda e Matos, 1989a] podem existir trânsitos de potência que não sendo viáveis são mesmo assim calculados. No SFPP/CFPP apenas são obtidos trânsitos de potência viáveis e o resultado, quando as potências especificadas não são possíveis é uma rede não adequada relativamente ao objectivo de servir “pedidos razoáveis de transporte de electricidade”. A rede (Figura 3.16) apresenta um grau de repressão de 0.6 com uma severidade global de repressão de 0.18 MW.

A obtenção do corte (ponto singular) para os barramentos com repressão é possível, por utilização de programação paramétrica (3.6). Com a finalidade apenas de fornecer uma

ilustração é construído o problema seguinte. Suponha-se que se quer conhecer o ponto singular relativo ao barramento 2 (CFPF), Figura 3.20 b (notar que este ponto foi encontrado fazendo estudos sistemáticos para vários cortes de nível α e corresponde a uma possibilidade de 0.6):

$$\text{máx (min)} \quad P_2 \quad (3.13)$$

$$\text{st:} \quad P_1 \geq 2 + \alpha \quad (3.14)$$

$$P_1 \leq 4 - \alpha \quad (3.15)$$

$$P_2 \geq 3 + \alpha \quad (3.16)$$

$$P_2 \leq 5 - \alpha \quad (3.17)$$

$$P_3 \geq 5 + 2\alpha \quad (3.18)$$

$$P_3 \leq 8 - \alpha \quad (3.19)$$

$$\alpha = 0 \quad (3.20)$$

$$0.3333P_2 + 0.3333P_3 \leq 3.8 \quad (3.21)$$

$$P_1 + P_2 - P_3 = 0 \quad (3.22)$$

$$\alpha \leq 1 \quad (3.23)$$

As aplicações de optimização linear, como o Solver do Excel, permitem a identificação dos valores de variação das restrições onde a base óptima do problema se mantém. Assim, integrando α no vector dos termos independentes é possível conhecer o intervalo de valores de α $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ que mantém a base óptima do problema. Para o efeito define-se o valor inicial de α (3.20) e executa-se o problema (3.13-3.23) onde (3.21) corresponde à restrição do limite do ramo 2-3. Por exemplo, se for definido $\alpha=0$, no problema de minimização obtém-se como resultado $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}] = [0, 1]$ e o valor de P_2 de 3MW. Significa que para cortes α entre 0 e 1 não existem pontos singulares. Por outro lado, quando se maximiza, é obtido $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}] = [0, 0.6]$ (e $P_2=4.7$ MW). Está identificado um ponto singular que ocorre em $\alpha=0.6$. Em seguida, se substituirmos 0 por 0.6 em (3.20) e resolvermos o problema novamente, obtemos um novo intervalo $[0.6, 1.0]$. Conclui-se que não existem mais pontos singulares. O mesmo procedimento poderia ser seguido para P_3 .

3.8 AS REPRESSÕES BÁSICAS

É interessante verificar que podem ocorrer repressões mesmo sem a consideração de limites nos ramos, situação que designamos por repressões básicas. Esta situação surge essencialmente nos casos em que a configuração da rede não admite completamente as especificações de potência pedidas. Nesta secção pretende-se ilustrar com um exemplo de uma rede de teste, as repressões básicas.

Considere-se a rede de 14 barramentos do IEEE (Figura 3.22) cujos dados estão disponíveis em [www.ee.washington.edu/research/pstca, 2008]. Neste caso optou-se por modelizar a incerteza (na produção/carga) com recurso a números difusos trapezoidais, sendo os valores característicos de α utilizados os seguintes: 0.00; 0.90 1.10; 3.00. Foi considerada uma potência de base de 100 MVA.

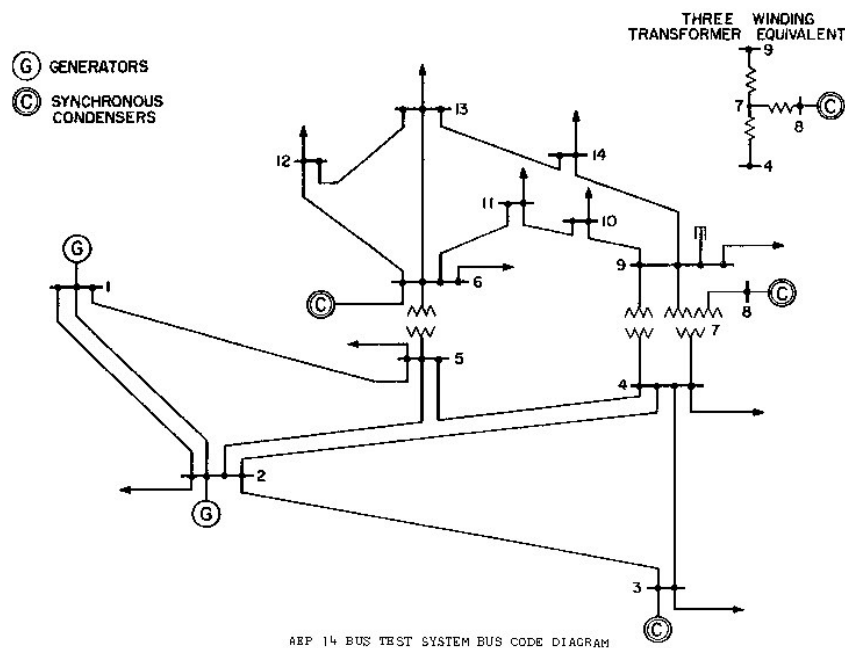


Figura 3.22 – Rede de teste IEEE 14 barramentos, 20 ramos

Na generalidade dos barramentos da rede que se estuda, a potência injectada especificada é respeitada. Exceptuam-se os casos dos barramentos 1 e 3 onde ocorrem repressões básicas. Nas Figura 3.23a e 3.23b, “Pi sp” e “Pi n” representam respectivamente a potência activa

injectada especificada e a potência activa injectada permitida nas condições actuais da rede ($P_{i n}$). Os valores foram obtidos sem consideração de limites nos ramos.

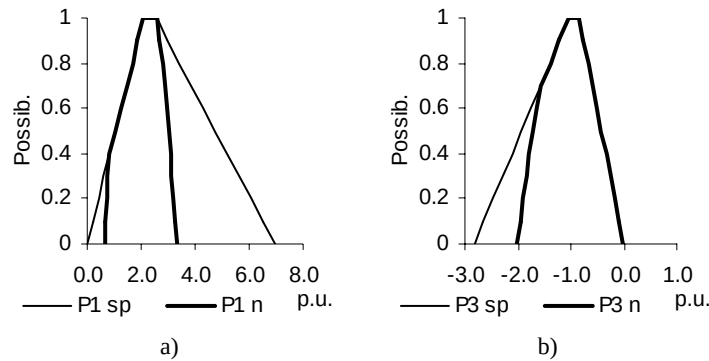


Figura 3.23 – Repressão básica de produção para o barramento 1 (a) e repressão básica de carga para o barramento 3 (b), potências activas injectadas

Pode-se observar que no barramento 3 para a configuração actual da rede nunca poderão ser satisfeitos pedidos de procura superiores a 2 pu ($\alpha=0$). Para satisfação dos pedidos de procura da rede, o barramento 1 deverá produzir sempre acima de 0.05 pu e nunca mais de 3.2 pu. Este tipo de informação permite que se ajuíze sobre as especificações de potência relativamente à configuração da rede. De facto a consideração de limites nos ramos irá agravar a situação, produzindo ainda maiores repressões.

3.9 CASO DE ESTUDO: APLICAÇÃO DO CFPF À REDE DE 24 BARRAMENTOS DO IEEE

Com a finalidade de ilustrar a aplicação do DC CFPF estudar-se-á a adequação da rede de 24 barramentos (Figura 3.24), 38 ramos do IEEE. Nos cálculos será utilizada uma potência de base de 500 MW.

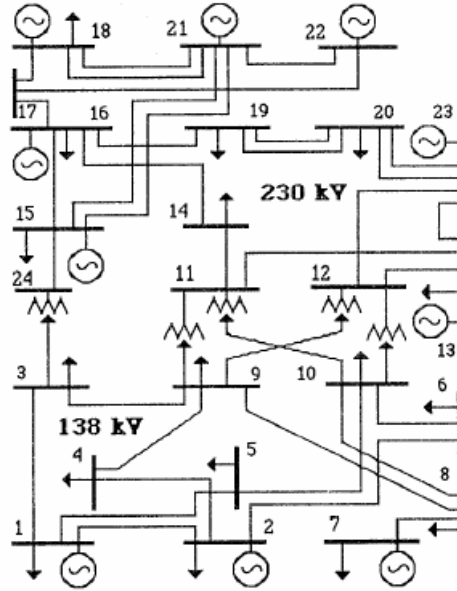


Figura 3.24 – Rede de teste IEEE 24 barramentos, 30 ramos

Os valores indicados na Tabela 3.1 serão considerados os valores centrais dos números difusos trapezoidais. Os pontos característicos dos números difusos serão 0.95, 0.98, 1.02 e 1.05 dos valores centrais (determinísticos). Por exemplo, a aplicação desta regra aos barramentos 9 e 21 (PQ) resulta nos seguintes números difusos trapezoidais (Figuras 3.25 e 3.26):

$$\tilde{P}_9 = (-330.8; -321.3; -308.7; -299.3) \text{ MW}$$

$$\tilde{P}_{21} = (665.0; 686.0; 714.0; 735.0) \text{ MW}$$

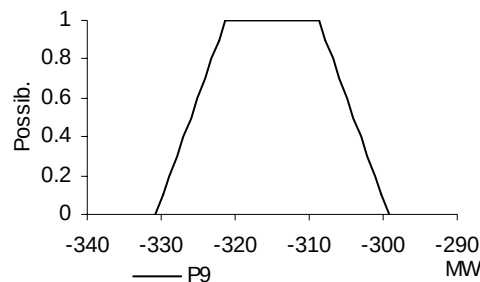


Figura 3.25 – Número difuso trapezoidal especificado para a potência activa injectada no barramento 9

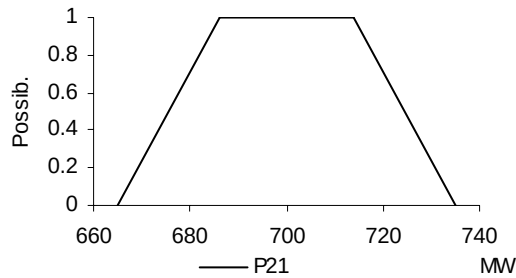


Figura 3.26 – Número difuso trapezoidal especificado para a potência activa injectada no barramento 21

Com a finalidade de serem obtidos valores de referência, foi em primeiro lugar aplicado o DC SFPF (3.1) no cálculo dos trânsitos de potência activa (P_{ik}). Em seguida foram estipulados limites para os ramos (Tabela 3.2) tendo-se depois utilizado o DC CFPF (3.4) para obter os novos trânsitos de potência, P_{ik}' .

Tabela 3.1 – Valores centrais considerados para as potências activas geradas (P_g) e consumidas (P_c)

Barra	P_g (MW)	P_c (MW)	Barra	P_g (MW)	P_c (MW)	Barra	P_g (MW)	P_c (MW)
1	260.0	194.4	9	0.0	315.0	17	0.0	0.0
2	300.0	174.6	10	0.0	351.0	18	300.0	599.4
3	0.0	324.0	11	0.0	0.0	19	0.0	325.8
4	0.0	133.8	12	0.0	0.0	20	0.0	230.4
5	0.0	127.8	13	700.0	477.0	21	700.0	0.0
6	0.0	244.8	14	0.0	349.2	22	400.0	0.0
7	700.0	225.0	15	300.0	570.6	23	1200.0	0.0
8	0.0	307.8	16	270.0	180.0	24	0.0	0.0

Tabela 3.2 – Dados dos ramos

Entre os barramentos:	X (pu)	Entre os barramentos:	X (pu)
1-2	0.0695	6-10	0.3025
1-3	1.0560	7-8	0.3070
1-5	0.4225	8-9	0.8255
2-4	0.6335	8-10	0.8255
2-6	0.9600	11-13	0.2380
3-9	0.5950	11-14	0.2090
4-9	0.5185	12-13	0.2380
5-10	0.4415	12-23	0.4830

Tabela 3.3 - Valores estipulados para limite da capacidade de transporte nos ramos

Entre os barramentos:	Limite (MW)
1-2	23
1-3	15
2-4	52
2-6	69
3-9	50
7-8	500
12-23	320
13-23	265
15-24	265
19-20	425
21-22	215

Tabela 3.4 – Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência no ramo 7-8

Ramo	0 (MW)	1 (MW)	1 (MW)	0.61 (MW)	0 (MW)
P ₇₋₈	428.8	463.4	486.6	500.00	521.3
P _{7-8'}	428.8	463.4	486.6	500.00	500.0

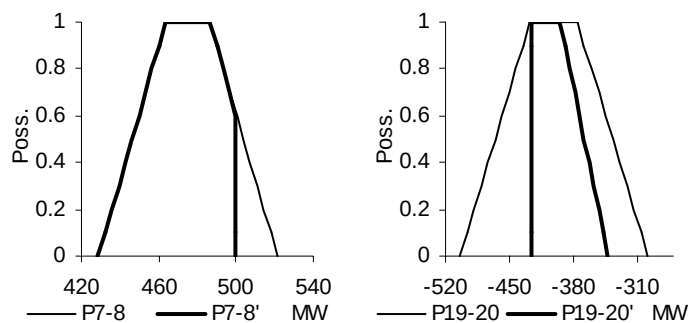
Tabela 3.5 – Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência no ramo 19-20

Ramo	0 (MW)	1 (MW)	1 (MW)	0 (MW)
P ₁₉₋₂₀	-504.7	-427.2	-375.4	-297.8
P _{19-20'}	-425.0	-425.0	-395.6	-341.7

Tabela 3.6 – Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência no ramo 14-16

Ramo	0 (MW)	1 (MW)	1 (MW)	0.89 (MW)	0.75 (MW)	0 (MW)
P ₁₄₋₁₆	-511.3	-443.8	-398.8	-391.4	-381.9	-331.3
P _{14-16'}	-448.2	-416.2	-398.8	-391.5	-383.6	-359.7

As Tabelas 3.4. a 3.6 mostram os resultados e os cortes de nível α relevantes para três dos ramos da rede (7-8, 19-20 e 14-16). Para os casos ilustrados, os ramos 7-8 e 19-20 representam situações de congestionamento, ou seja é atingido o limite técnico do ramo (500 e 425 MW, respectivamente). O ramo 19-20 é influenciado não apenas pelo seu limite (425MW) mas também indirectamente pelos congestionamentos existentes em outros ramos da rede. Também o ramo 14-16 que não tem limite definido, está sobre a influência do congestionamento de outros ramos. As Figuras 3.27 e 3.28 ilustram estes casos graficamente e a informação completa sobre os fluxos de carga pode ser lida no Anexo B.

**Figura 3.27 – Trânsito de potência activa difuso para os ramos 7-8 (a) e 19-20 (b)**

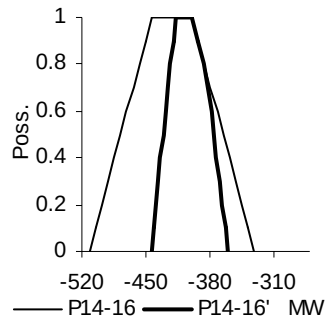


Figura 3.28 – Trânsito de potência activa difuso para o ramo 14-16

Resolvendo em seguida o problema (3.4) para os limites nos barramentos conforme Tabela 3.3 são obtidas repressões para as potências activas injectadas (P_i') em 5 barramentos: 2, 3, 7, 22 e 23. Nas Figuras 3.29 e 3.30, P_i corresponde à potência activa injectada especificada para o barramento. Como se pode constatar por observação das figuras, os barramentos 2, 7, 22, e 23 representam repressões na produção. O barramento 3 apresenta uma repressão na carga.

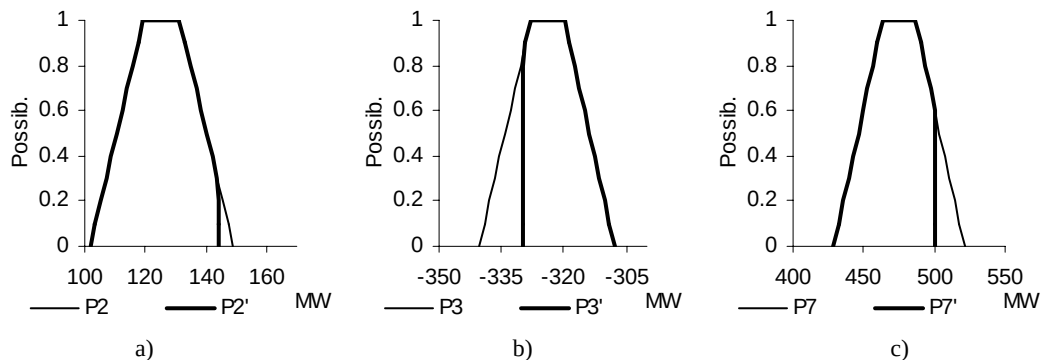


Figura 3.29 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada nos barramentos 2 (a), 3 (b) e 7(c), repressões

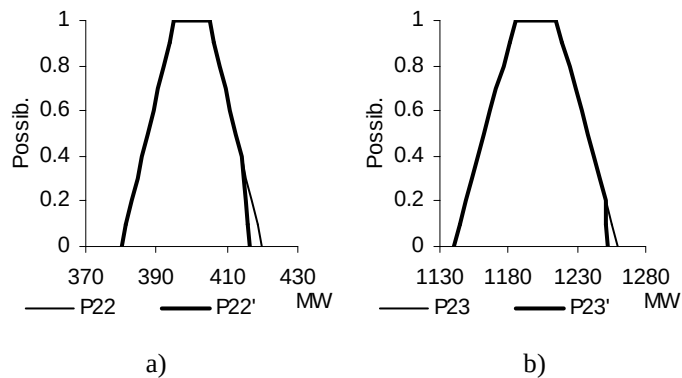


Figura 3.30 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada nos barramentos 22 e 23, repressões

O máximo grau de repressão ocorre para o barramento 3 e assume o valor de 0.84 (Tabela 3.7). Este valor significa que existe uma possibilidade de 0.84 de a rede de transporte não satisfazer os requisitos de transporte de electricidade. A severidade global de repressão é de cerca de 13 MW. Este valor representa uma pequena percentagem da carga total. Assim, os problemas de adequação são principalmente locais (barramento 3 com um grau de repressão de 0.84).

As Tabelas 3.7 a 3.9 mostram para os barramentos 3, 22 e 23, os valores e os cortes de nível α relevantes para as situações em que ocorre repressão (P_i') relativamente às potências especificadas (P_i).

Tabela 3.7 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada no barramento 3

Barra	0 (MW)	0.84 (MW)	1 (MW)	1 (MW)	0 (MW)
P_3	-340.2	-330.0	-328.1	-320.0	-307.8
P_3'	-330.0	-330.0	-328.1	-320.0	-307.8

Tabela 3.8 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada no barramento 22

Barra	0 (MW)	1 (MW)	1 (MW)	0.38 (MW)	0 (MW)
P_{22}	380.0	395.0	405.0	414.3	420.0
P_{22}'	380.0	395.0	405.3	414.3	416.4

Tabela 3.9 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada no barramento 23

Barra	0 (MW)	1 (MW)	1 (MW)	0.23 (MW)	0 (MW)
P_{23}	1140.0	1185.0	1215.0	1249.6	1260.0
P_{23}'	1140.0	1185.0	1215.0	1249.6	1251.9

A Tabela 3.10 resume os resultados encontrados em termos de adequação da rede de 24 barras relativamente às potências activas injectadas especificadas para os barramentos. Um resultado interessante corresponde à análise do grau de repressão/severidade individual de repressão. O barramento 3 indica o grau de repressão do sistema. Ou seja é este barramento que constitui o pior caso de inadequação da rede. No entanto, em termos de severidade individual de repressão não é este barramento que oferece o maior valor. A maior severidade individual de repressão acontece no barramento 7 com cerca de 6.5 MW a que corresponde um grau de repressão de 0.62. Esta informação surge ilustrada na Figura 3.31. Nestes casos terá de se

julgar o que se considera mais importante para satisfação dos níveis desejados de adequação da rede. Estes aspectos (melhoria do grau e da severidade de repressão) serão estudados no Capítulo 4, quando forem discutidas as estratégias conducentes ao reforço da rede de transporte.

Tabela 3.10 – Severidade individual de repressão, severidade global de repressão e grau de repressão

	Severidade individual de repressão (MW)			Grau de Repressão
	Esquerda	Direita	Total	
P2		0.7394	0.7394	0.29
P3	4.2814		4.2814	0.84
P7		6.5091	6.5091	0.62
P22		0.6566	0.6566	0.37
P23		0.8845	0.8845	0.23
Severidade global de repressão (MW)			13.071	

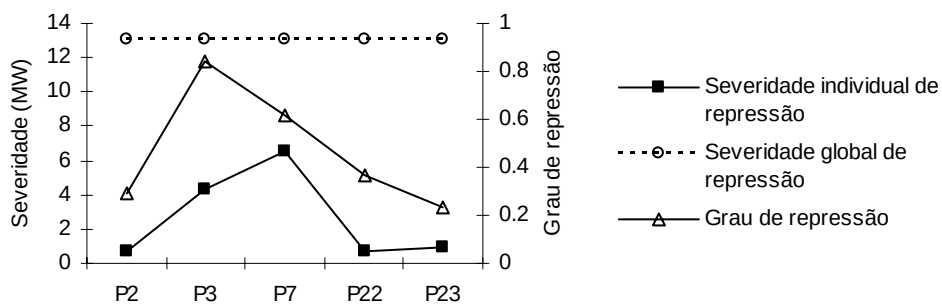


Figura 3.31 - Severidade individual de repressão, severidade global de repressão e grau de repressão

3.10 CASO DE ESTUDO: APLICAÇÃO DO CFPP À REDE DE 118 BARRAMENTOS DO IEEE

O AC CFPP foi testado em diversas redes do IEEE (14, 30 e 118 barramentos). Por forma a se ilustrar a avaliação da adequação do sistema de transporte aplicando o AC CFPP foi escolhida a rede de 118 barramentos, 184 ramos do IEEE (Figura 3.32).

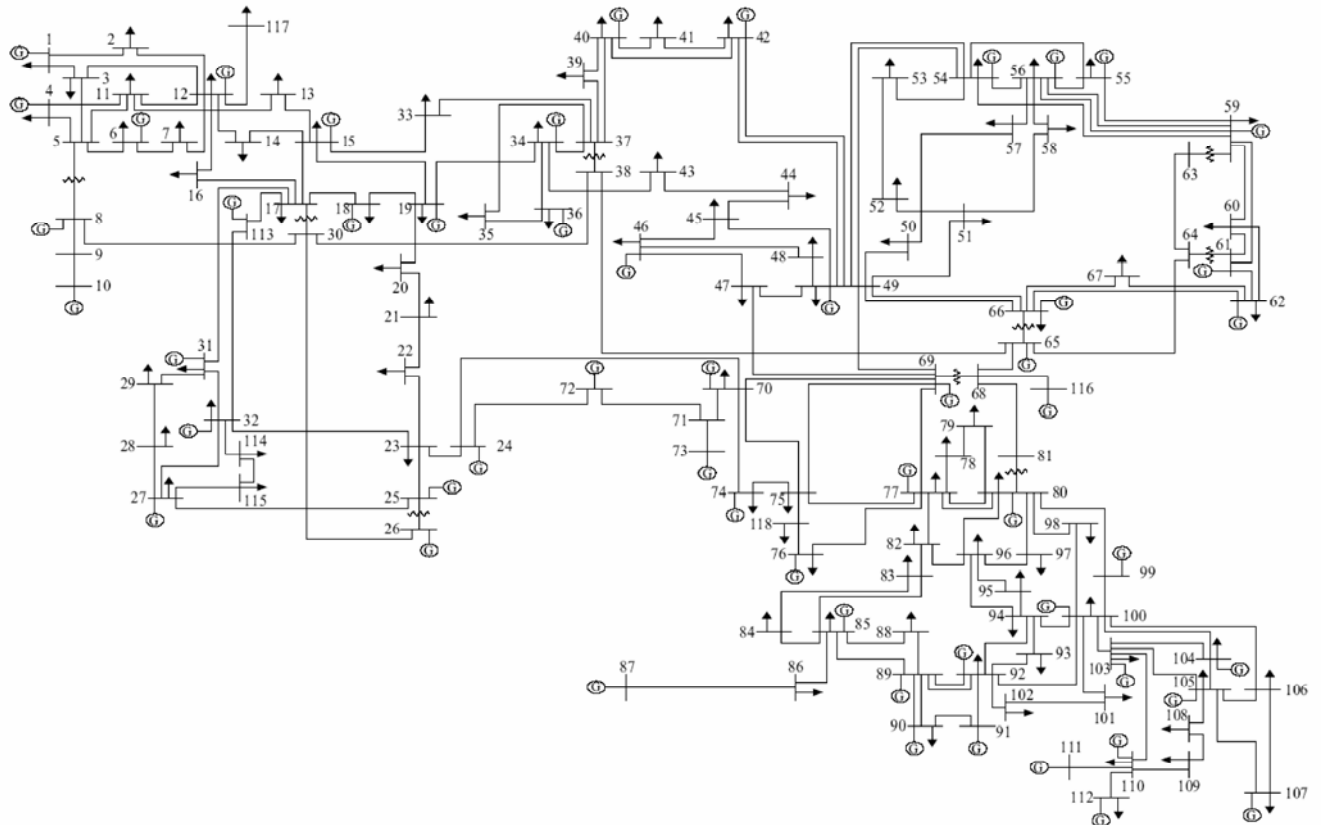


Figura 3.32 – Rede de teste IEEE 118 barramentos, 184 ramos

Os pontos característicos dos números difusos são mostrados na Tabela 3.11. Por uma questão de clareza na exposição optou-se por fazer a modelização difusa com conjuntos de barramentos relativamente aos valores centrais previstos para o SEE que poderão ser encontrados (assim como os dados da rede) no endereço www.ee.washington.edu/research/pstca (valores determinísticos). Foi utilizada uma potência de base de 100 MVA. A aplicação dos pontos característicos aos valores centrais irá permitir obter números difusos trapezoidais para cada barramento. Os limites à capacidade de transporte dos ramos poderão ser consultados no Anexo B.

Para as potências reactivas geradas optou-se por se atribuir distribuições de possibilidade rectangulares (definição dos valores máximo e mínimo de produção de cada gerador).

Tabela 3.11 – Pontos característicos a aplicar aos valores centrais (determinísticos) da rede de 118 barramentos

Barramentos	Modelização difusa da produção activa			
1-118	0.9500	0.9875	1.0125	1.0500
Modelização difusa da carga activa				
1-20	0.2000	0.9875	1.0125	1.8000
21-29	0.8000	0.9875	1.0125	1.2000
30-40	0.5000	0.9875	1.0125	1.5000
41-59	0.8000	0.9875	1.0125	1.2000
60-90	0.5000	0.9875	1.0125	2.0000
91-118	0.8000	0.9875	1.0125	1.2000
Modelização difusa da produção reactiva				
1-118	0.9000	0.9000	1.1000	1.1000
Modelização difusa da carga reactiva				
1-118	0.8000	0.9875	1.0125	1.2000

Com a finalidade de obter valores de referência para os fluxos de potência (S_{ik}) aparentes foi utilizado primeiro o AC SFPF (3.7). Em seguida foi utilizado o AC CFPF (3.8) que permitiu obter os novos valores dos fluxos de carga (S_{ik}') de acordo com os limites dos ramos. Como no modelo DC, a resolução destes problemas fornece importante informação sobre os congestionamentos que poderão verificar-se para as condições actuais da rede. As situações de congestionamento ilustradas a seguir são relativas a apenas a alguns dos ramos e para trânsitos de potência aparente, podendo todos os resultados para os 184 ramos ser consultados no Anexo B. Se for desejado, poderão calcular-se os trânsitos de potência activa ou reactiva nos ramos ou as perdas desde que se altere a função objectivo dos problemas (3.7) e (3.8) com as respectivas expressões.

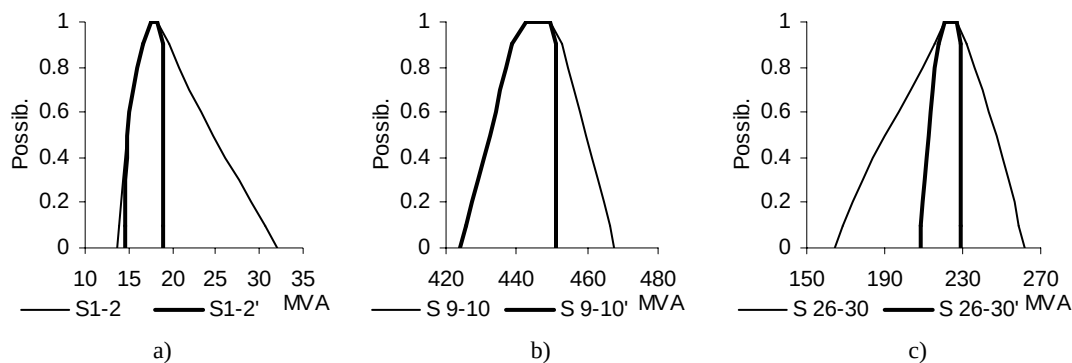


Figura 3.33 – Distribuições de possibilidade para os trânsitos de potência nos ramos 1-2 (a), 9-10 (b) e 26-30 (c)

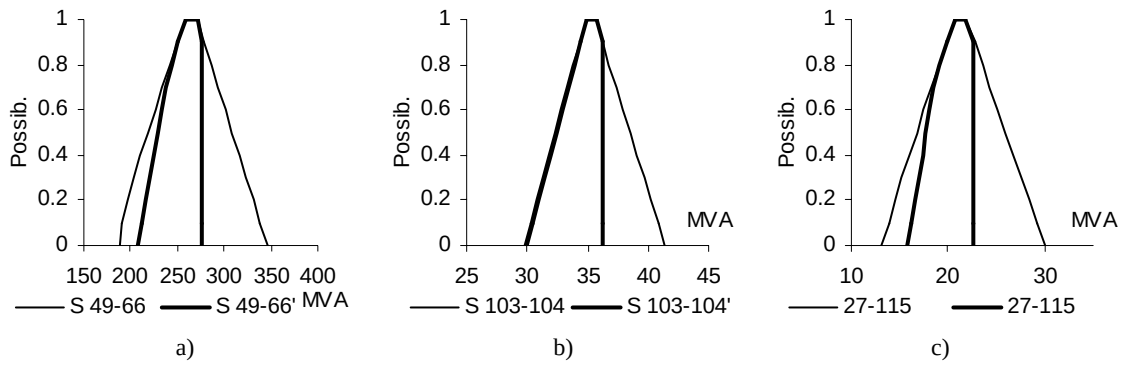


Figura 3.34 – Distribuições de possibilidade para os trânsitos de potência nos ramos 49-66 (a), 103-104 (b) e 27-115 (c)

As Figuras 3.33 e 3.34 ilustram situações de congestionamento elevado nos ramos do sistema. Os ramos 9-10 e 103-104 ilustram casos em que o congestionamento existente se deve directamente ao limite de capacidade de transporte (cerca de 450 MVA e 36 MVA, respectivamente). Os restantes ramos ilustrados nas mesmas figuras, além do congestionamento provocado pelos seus limites físicos, mostram também a influência dos constrangimentos da rede (outros ramos) para certos níveis de potência aparente (caso dos ramos 1-2, 26-30, 49-66 e 27-115).

Como anteriormente, a adequação da rede de transporte é medida em termos de repressões existentes nos barramentos. A Tabela 3.12 resume os resultados no que se refere aos índices de repressão obtidos para a severidade individual de repressão, severidade global de repressão e grau de repressão para as potências activas injectadas. Surgem 28 barramentos com repressão de potência activa, oito dos quais apresentam um grau de repressão máximo (1.0). A severidade global de repressão é de cerca de 283 MW, cerca de 7% da carga activa total (determinística) do SEE. Existem problemas locais que se identificam nos barramentos com grau de repressão 1 e próximos (0.9) que configuram um problema global cuja severidade é considerável. Se a finalidade for diminuir a severidade de repressão, uma boa estratégia é identificar a barra ou barras que mais contribuem para este índice. Neste caso, o barramento 90 (Tabela 3.12) apresenta um contributo de 83 MW.

Existe também um conjunto de barramentos com contributos significativos (62, 74, 76 e 78). Este conjunto contribui com 98 MW para a severidade global de repressão. É assim muito importante identificar no problema quais as barras que têm maior severidade individual de repressão. Este é o ponto de partida para decidir sobre acções de reforço a efectuar em

determinados ramos. A finalidade é diminuir as repressões, permitindo uma melhor adequação da rede de transporte. De facto, os congestionamentos que se calculam (Figuras 3.33 e 3.34) apesar de serem um indicador do estado de determinados pontos da rede, não permitem de forma imediata conjecturar sobre quais os melhores pontos (ramos) a reforçar.

Tabela 3.12 – Severidade individual de repressão, severidade global de repressão e grau de repressão

Barra	Severidade individual de repressão (MW)			Grau de Repressão
	Esquerda	Direita	Total	
1	16.5		16.5	1.0
3	0.1		0.1	0.2
10		8.7	8.7	1.0
15	8.5	6.9	15.4	1.0
26		0.2	0.2	0.2
31	2.0		2.0	0.6
36	0.8		0.8	0.4
40	1.3		1.3	0.4
55	1.2		1.2	0.5
62	21.3		21.3	1.0
70	12.1		12.1	0.9
72	1.5		1.5	0.9
73	2.8		2.8	1.0
74	27.7		27.7	1.0
76	23.9		23.9	1.0
78	25.2		25.2	0.9
80		0.2	0.2	0.1
82	0.6		0.6	0.2
86	9.5		9.5	1.0
88	4.4		4.4	0.5
90	72.8	10.1	82.9	1.0
107	3.3		3.3	0.9
111	0.4	0.9	1.3	1.0
112	5.2		5.2	0.9
115	0.3		0.3	0.4
116	13.6		13.6	0.9
117	1.3		1.3	0.9
Severidade global de repressão (MW)			283	

Em seguida são apresentados graficamente parte dos resultados obtidos para os barramentos com repressão. Nestes resultados é possível identificar barramentos com grau de repressão máximo (Figura 3.35, Figura 3.36c). Pode também verificar-se que um grau de repressão maior não corresponde sempre a uma maior severidade de repressão, caso dos barramentos 82 (Figura 3.37b) e 115 (Figura 3.37c). As distribuições de possibilidade para todos os barramentos com repressão deverão ser consultadas no Anexo B. De realçar que os barramentos 10, 15, 90 e 111 (Tabela 3.12) configuram situações onde existe *repressão básica*. Este tipo de repressão deve ser considerado uma vez que constitui um impedimento

das potências injectadas especificadas. Ou seja, os pedidos de transporte não são possíveis em determinadas circunstâncias, mas essa situação não é devida aos limites dos ramos própria configuração da rede (sem limites de ramos) não permite, neste caso, a satisfação dos pedidos de produção e de carga.

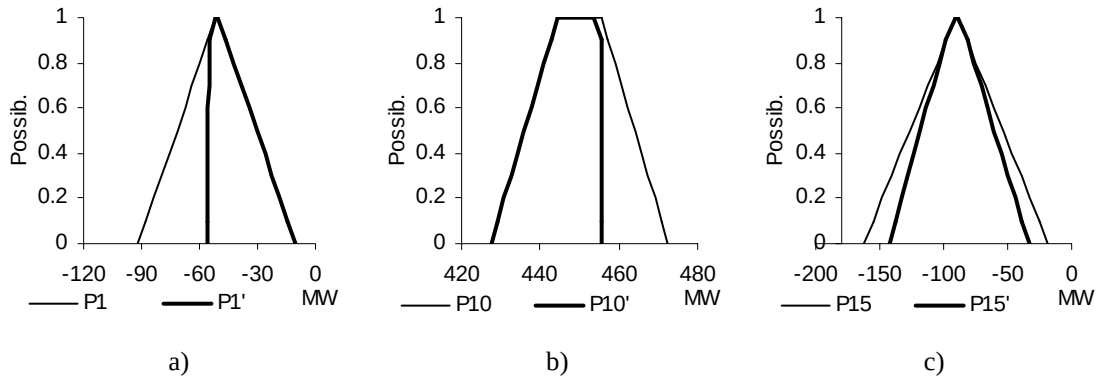


Figura 3.35 - Distribuição de possibilidade para as potências activas injectadas nos barramentos 1 (a), 10 (b) e 15 (c)

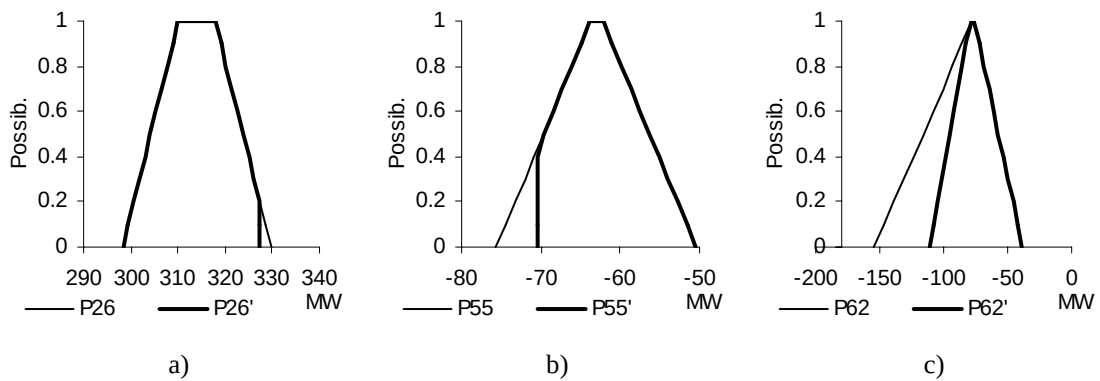


Figura 3.36 - Distribuição de possibilidade para as potências activas injectadas nos barramentos 26 (a), 55 (b) e 62 (c)

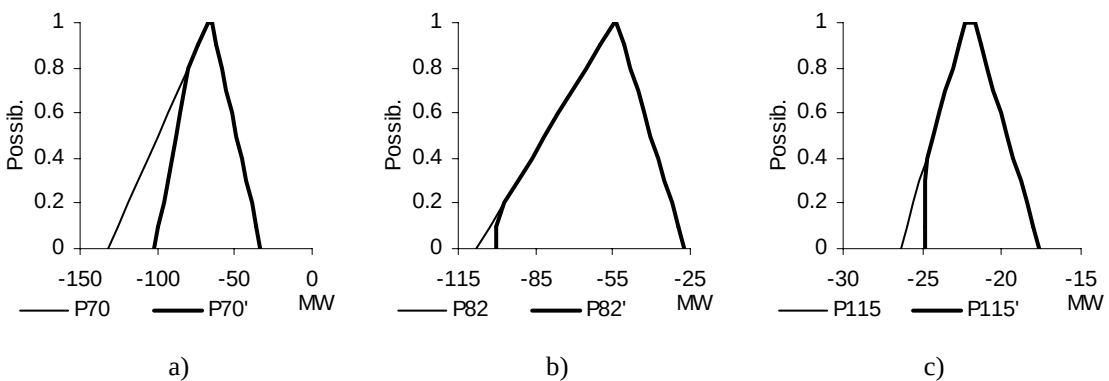


Figura 3.37 - Distribuição de possibilidade para as potências activas injectadas nos barramentos 70 (a), 82 (b) e 115 (c)

Da observação dos resultados completos (Tabela 3.12 e Anexo B) pode concluir-se que a

maior parte da repressão afecta a carga. No espírito da Directiva 2003/54/EC a rede não “satisfaz os pedidos razoáveis de transporte de electricidade” originando neste caso perdas de oportunidade no mercado de energia. A avaliação da adequação da rede aplicando o AC CFPF permite identificar também repressões de potência reactiva da carga nos barramentos. Esta é uma das possibilidades do modelo embora o maior interesse da aplicação venha com as injeções de potência activa pois são estas que as que representam interesse do ponto de vista do mercado. Em seguida (Tabela 3.13) identificam-se os barramentos com repressão da potência reactiva de carga assim como os respectivos índices de repressão. Ao contrário da análise das potências activas, a análise de reactiva não contempla as repressões na produção já que estas potências correspondem aos limites dos geradores. A severidade global de repressão é de cerca de 27 Mvar. O barramento que mais contribui para esta severidade é o barramento 59 com uma severidade individual de repressão de 12.7 Mvar. O grau de repressão é máximo.

Tabela 3.13 – Severidade global de repressão (Mvar) e grau de repressão

	Sev. Individ. Rep.	Grau de Repressão
Q31	1.0	1.0
Q36	0.0	0.8
Q42	0.2	0.9
Q49	0.0	0.8
Q55	0.7	1.0
Q59	12.7	1.0
Q66	0.4	0.5
Q80	0.3	0.3
Q100	1.0	0.8
Q103	5.3	1.0
Q105	0.5	1.0
Q110	1.0	1.0
Q112	2.6	1.0

A Figura 3.38 mostra a distribuição de possibilidade para a potência reactiva de carga no barramento 66. O grau de repressão é de 0.5 e a severidade individual de repressão atinge os 0.4 Mvar.

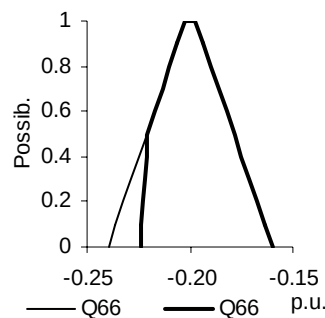


Figura 3.38 - Distribuição de possibilidade para a potência reactiva injectada no barramento 66

3.11 DIFERENÇAS DO SFPP PARA OUTRAS METODOLOGIAS

Nesta secção discutem-se as semelhanças e as diferenças entre as formulações tradicionais e o SFPP para os modelos DC e AC. Para este efeito são utilizadas algumas redes do IEEE: 14 barramentos, 24 barramentos, 30 barramentos e 118 barramentos.

Comparação DC FPF tradicional com DC SFPP

Para a rede de 24 barramentos do IEEE, são novamente comparados os modelos clássicos (denominados anteriormente por First e Cons.) e o SFPP (Sym.). No caso da rede de 3 barramentos (Figura 3.6) apenas foi encontrada incerteza adicional para as formulações tradicionais nos ramos adjacentes aos barramentos. A utilização de uma rede maior permitirá verificar se esta situação é uma regra. Foram considerados os pontos característicos da Tabela 3.14 e o barramento 1 como de referência. Relativamente à Tabela 3.1 (produção), a barra 7 deixa de ter um valor determinístico de 700MW e passa a ter 400 MW. Esta alteração permite a comparação com valores encontrados na literatura [Saraiva, 1992; Saraiva e Duarte, 1996].

Tabela 3.14 – Pontos característicos a aplicar aos valores centrais (determinísticos) da rede de 118 barramentos

Barramentos	Modelização difusa da produção activa			
1-13, 14-24	0.9500	0.9800	1.0200	1.0500
13	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Modelização difusa da carga activa				
1-5, 7-19, 21-24	0.9500	0.9800	1.0200	1.0500
6, 20	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Considerou-se para o modelo “Cons.” que os limites de produção do gerador seriam [0; 800] MW. Considerou-se que no modelo “Sym” era conhecida a especificação da potência gerada, correspondendo esta ao número difuso trapezoidal da Figura 3.39.

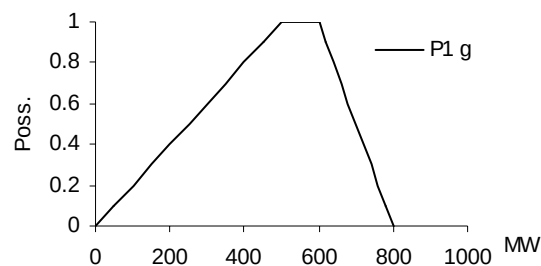


Figura 3.39 – Número difuso trapezoidal que caracteriza a potência gerada no barramento de referência

Em seguida podem ser visualizadas algumas das distribuições comparando os três modelos. No modelo “First” é visível o efeito da incerteza nos trânsitos de potência. Com a colocação do limite em 800 MW para a barra de referência (Cons.), o problema é atenuado, mas continuam a verificar-se trânsitos de potência inviáveis (Figuras 3.40 a 3.43) nos cortes superiores a $\alpha=0$. Novamente toda a incerteza vai concentrar-se na barra de referência.

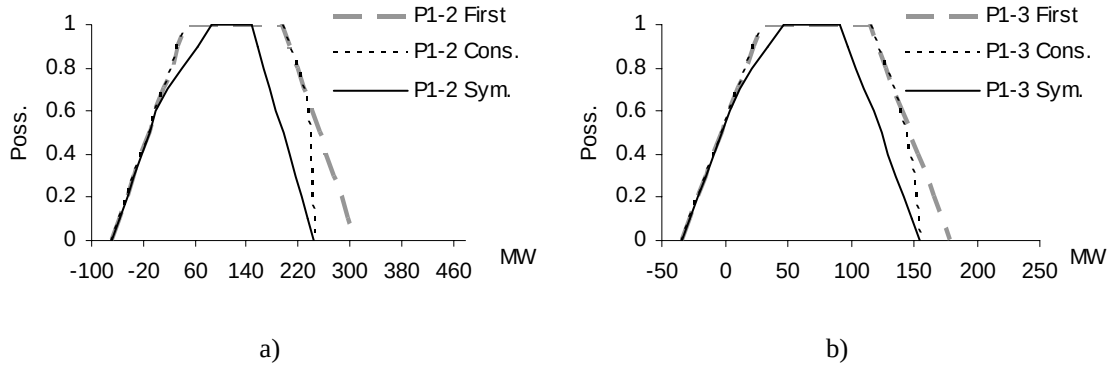


Figura 3.40 – Distribuição de possibilidade para trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 1-3 (b)

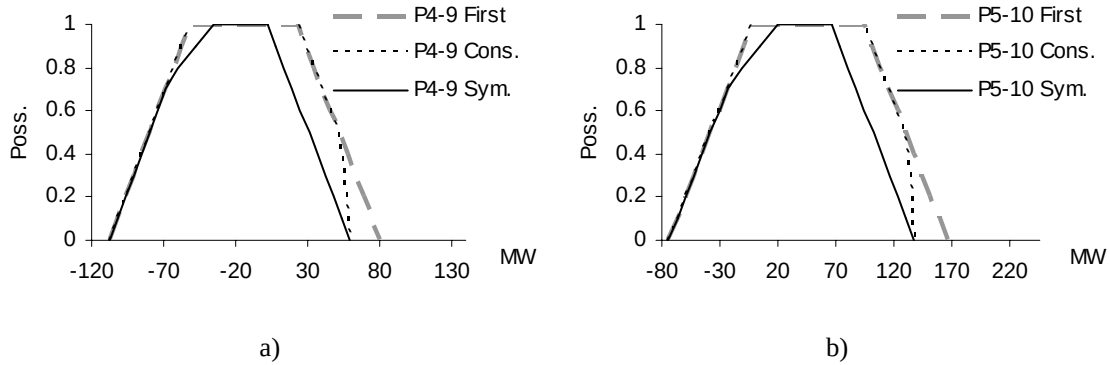


Figura 3.41 – Distribuição de possibilidade para trânsito de potência activa nos ramos 4-9 (a) e 5-10 (b)

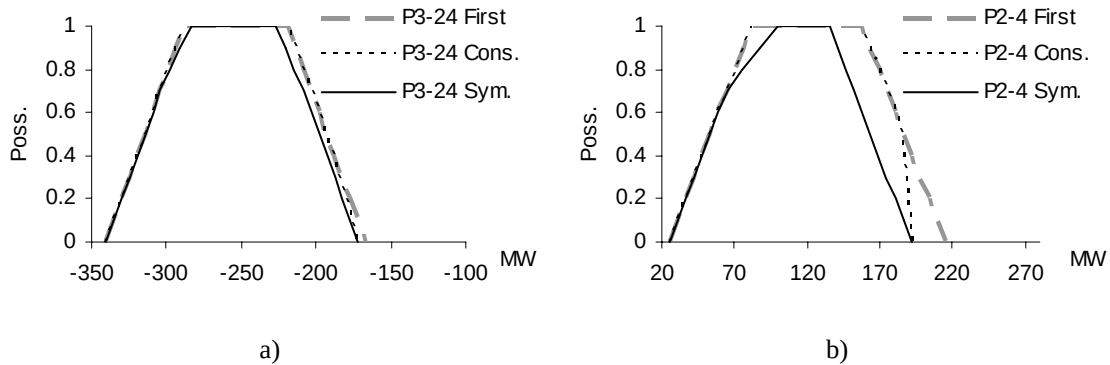


Figura 3.42 – Distribuição de possibilidade para trânsito de potência activa nos ramos 3-24 (a) e 2-4 (b)

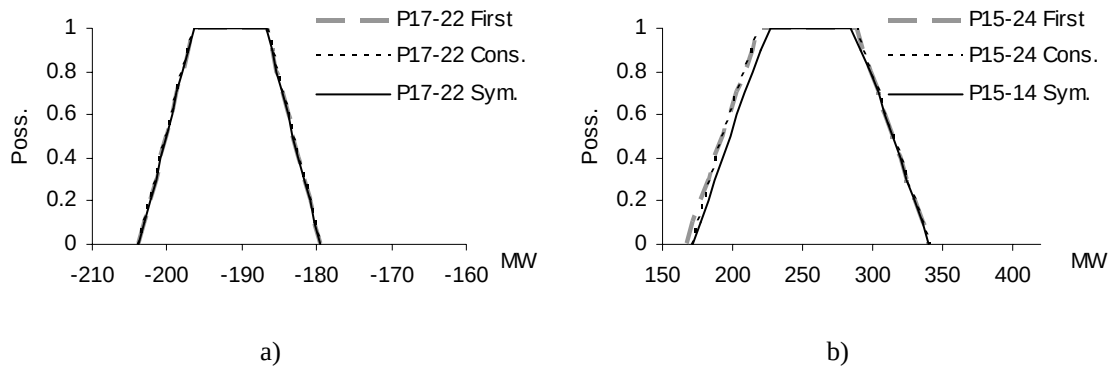


Figura 3.43 – Distribuição de possibilidade para trânsito de potência activa nos ramos 17-22 (a) e 15-24 (b)

Da análise dos resultados pode-se concluir que a incerteza artificial existente nas formulações clássicas também se verifica em ramos não adjacentes.

Um outro aspecto relevante é a existência de repressões básicas que podem surgir e que não detectadas, excepto no SFPP. Suponha-se por exemplo o aumento da carga 19 correspondente à caracterização do ponto característico $\alpha(0+)=5.0$ (1690MW). Aplicando as metodologias do estudo anterior, seria obtido (Figura 3.44):

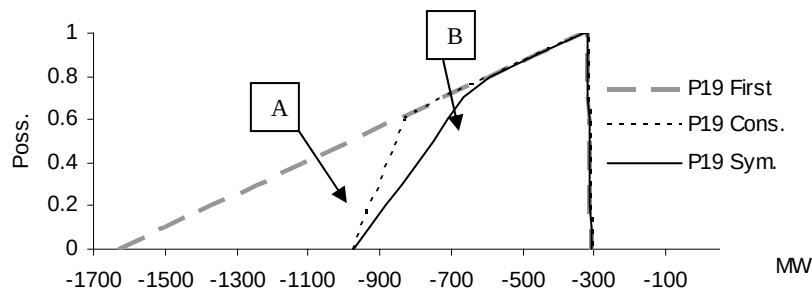


Figura 3.44 – Distribuição de possibilidade para carga do barramento 19

A formulação inicial permite a alimentação completa da carga, a formulação com limites ($\alpha=0$) e o SFPP apenas permitem a carga “possível” dentro da configuração do sistema. As áreas A e B correspondem à repressão básica da barra 19.

Comparação de metodologias AC de FPF com SFPP AC

Também se realiza o exercício de comparar o AC SFPP com os modelos de FPF AC tradicionais disponíveis na literatura [Saraiva et al, 1991; Dimitrovski e Tomsovic, 2004a; 2004b; 2005a]. Os resultados obtidos são semelhantes, mas pode notar-se a influência da distorção produzida pelo barramento de compensação nas versões tradicionais de FPF. A

Tabela 3.15 mostra as amplitudes das tensões ($\alpha=0$) na rede de 14 barramentos quando se utiliza o BLF [Dimitrovski e Tomsovic, 2004b] e o SFPF AC. Como pontos característicos (pc) para $\alpha=0$ foram assumidos os valores 0.0 e 2.0 do caso determinístico [www.ee.washington.edu/research/pstca, 2008]. As Tabelas 3.16 e 3.17 mostram os resultados quando se calculam os trânsitos de potência activa e reactiva. Note-se que no BLF não é considerado qualquer procedimento de correcção no barramento de compensação, sendo feito recurso a linearizações, como se explicou no Capítulo 2, no decorrer do processo.

Tabela 3.15 – Distribuição rectangular para as amplitudes das tensões, rede de 14 barramentos

$\alpha=0$, pc [0.0-2.0]				
U na barra	BLF (pu)		SFPF AC (pu)	
4	0.978	1.045	0.992	1.045
5	0.981	1.042	0.996	1.042
7	1.024	1.089	1.051	1.088
9	1.001	1.101	1.028	1.101
10	0.997	1.096	1.020	1.096
11	1.025	1.084	1.038	1.083
12	1.036	1.072	1.039	1.072
13	1.023	1.074	1.028	1.074
14	0.972	1.089	0.992	1.088

Tabela 3.16 – Distribuição rectangular para os trânsitos de potência activa, rede de 14 barramentos

$\alpha=0$, pc [0.0-2.0]				
P i-k	BLF (pu)		SFPF AC (pu)	
P 1-2	-0.652	4.194	0.449	2.006
P 1-5	-0.132	1.722	0.125	1.155
P 2-3	-0.020	1.571	0.017	1.236
P 2-4	-0.019	1.189	0.011	1.001
P 13-14	-0.123	0.243	-0.121	0.225

Tabela 3.17 – Distribuição rectangular para os trânsitos de potência reactiva, rede de 14 barramentos

$\alpha=0$, pc [0.0-2.0]				
Q i-k	BLF (pu)		SFPF AC (pu)	
Q 1-2	-0.614	0.470	-0.300	0.096
Q 1-5	-0.045	0.158	-0.033	0.134
Q 2-3	0.011	0.166	0.011	0.157
Q 2-4	-0.112	0.121	-0.113	0.061
Q 13-14	-0.069	0.113	-0.068	0.110

Pode-se concluir que os resultados obtidos utilizando o SFPF AC produzem geralmente um intervalo menor do que aqueles obtidos com o BLF que considera barramento de compensação.

Na rede de 118 barramentos é possível comparar a amplitude da tensão no corte $\alpha=0$ e para os pontos característicos 0.6 e 1.4 no barramento 44, nos casos em que utiliza o FPF tradicional [Saraiva et al, 1991], o BFL [Dimitrovski e Tomsovic 2004a] e o SFPP. Baseado no facto do SFPP ser um método sem recurso a linearizações, pode-se referir (Tabela 3.21) que não existirá nenhum trânsito de potência que corresponda a uma amplitude de tensão no barramento 44 inferior a 0.956 pu. Envolvendo os mesmos modelos e pc são ainda comparados os trânsitos de potência activa e reactiva entre os barramentos 68 e 69.

Tabela 3.18– Distribuição de possibilidade para a amplitude da tensão, rede de 118 barramentos

V	FPF (pu)		BPF (pu)		SFPP (pu)	
44	0.942	1.027	0.873	1.007	0.956	1.007

Tabela 3.19– Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa entre os barramentos 68 e 69, rede de 118 barramentos

Pik	FPF (pu)		BPF (pu)		SFPP (pu)	
68-69	-17.436	14.920	-21.098	13.267	-3.738	1.385

Tabela 3.20– Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa entre os barramentos 68 e 69, rede de 118 barramentos

Qik	FPF (pu)		BPF (pu)		SFPP (pu)	
68-69	0.392	1.864	0.844	9.252	1.067	1.331

O BLF apresenta também uma formulação que inclui procedimentos de correcção com vista a limitar o excesso de incerteza produzido pelo barramento de compensação. Os resultados seguintes permitem comparar os valores obtidos pela versão do BLF com procedimentos de correcção para o barramento de compensação [Dimitrovski e Tomsovic 2004b; 2005a] com os resultados obtidos pelo AC SFPP. Segundo os autores e considerando $pc=[0.5, 1.5]$ na modelização, quando é executado o BPF sem colocação de qualquer limite de produção no gerador do barramento 1, os valores de produção correspondem ao intervalo $[0.8372, 4.0599]$ pu. Por outro lado, quando aplicam o procedimento de correcção que corresponde à colocação de limites no gerador (e utilizando o processo de conversão da barra de referência para barra PV explicado no Capítulo 2) sendo esses limites $[0.1, 2.5]$ pu, o novo intervalo obtido é $[0.8372, 2.5000]$ pu. Se utilizarmos o SFPP sem limites na produção e com os limites

referidos, são obtidos para cada caso, respectivamente os intervalos $[0.8724, 2.8634]$ pu e $[0.8724, 2.500]$ pu.

A rede de 30 barramentos do IEEE (Figura 3.45) é utilizada para comparar os resultados obtidos para o SFPP e uma metodologia apresentada por Sun et al [2000]. Esta metodologia, como se referiu no Capítulo 2, utiliza procedimentos de optimização mas trata a barra de compensação e referência da mesma forma que as metodologias clássicas de FPF. São comparados dois modelos propostos pelos autores, um não linear, o outro admitindo linearizações para os cortes α intermédios entre $[0$ e $1]$. Nas figuras seguintes estas formulações serão denominadas *HX NL* e *HX L*, referindo-se respectivamente ao modelo não linear e ao modelo linear. Foram considerados os pontos característicos da Tabela 3.21 aplicados aos dados determinísticos [www.ee.washington.edu/research/pstca, 2008] e o barramento 1 como de referência. Foi utilizada uma potência de base de 100 MVA.

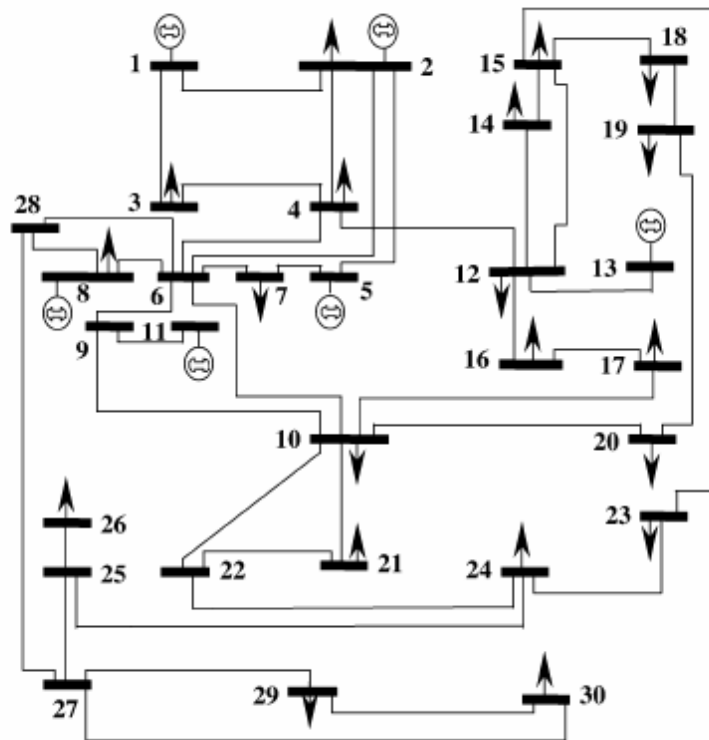
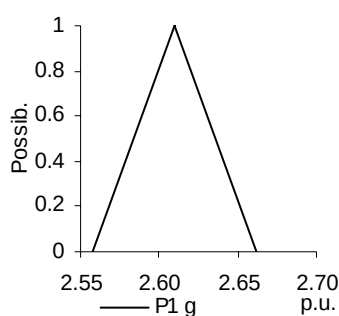
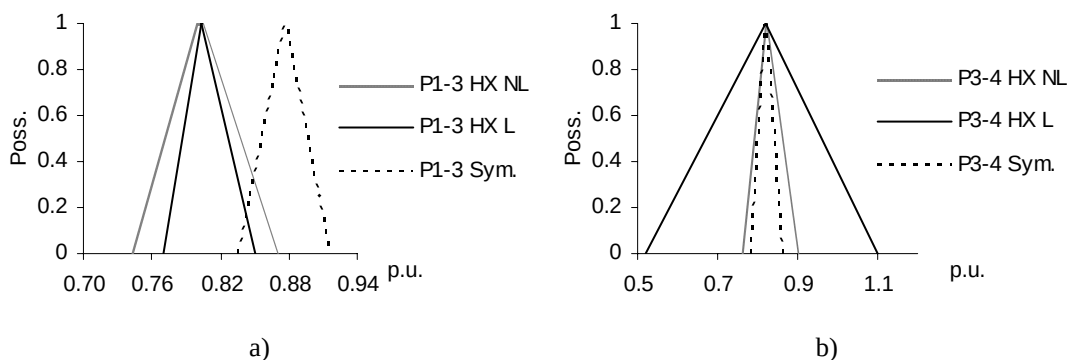
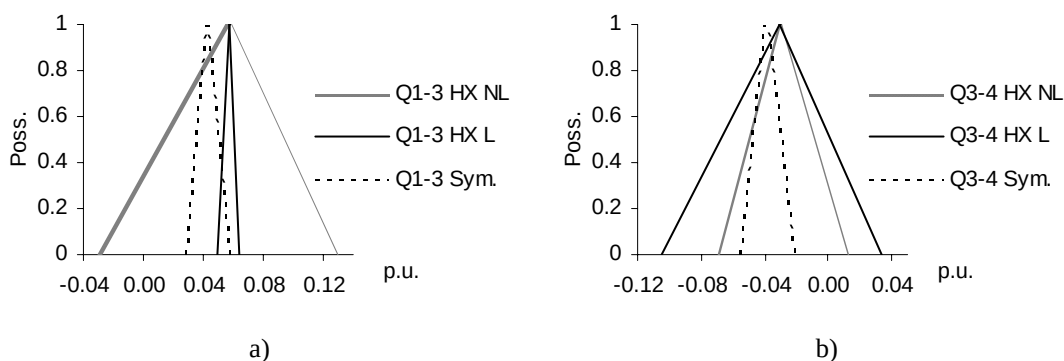


Figura 3.45 – Rede de 30 barramentos do IEEE

Tabela 3.21 – Pontos característicos a aplicar aos valores centrais (determinísticos) da rede de 30 barramentos

Barramentos	Modelização difusa da produção activa			
2-30	0.9000	1.0000	1.0000	1.1000
Modelização difusa da carga activa				
1-30	0.9000	1.0000	1.0000	1.1000
Modelização difusa da carga reactiva				
1-30	0.8000	1.0000	1.0000	1.2000

Considerou-se que no modelo “Sym” era conhecida a especificação da potência gerada (pu), correspondendo esta ao número difuso trapezoidal da Figura 3.53. Apenas foram comparados os resultados disponíveis em [Sun et al, 2000].

**Figura 3.46 – Número difuso trapezoidal que caracteriza a potência gerada no barramento de referência****Figura 3.47 – Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-3 (a) e 3-4 (b)****Figura 3.48 – Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência reactiva nos ramos 1-3 (a) e 3-4 (b)**

Nas formulações HX é escolhido um barramento para compensação ou em alternativa um conjunto de barramentos de compensação. Os autores não são claros quanto a este aspecto. Dado que se trata de distribuições de possibilidade triangulares e uma vez que os autores consideram a possibilidade de um barramento de compensação, foi executado um TP determinístico para o corte $\alpha=1$. Os resultados encontrados para este corte são muito diferentes relativamente aos apresentados nas Figuras 3.47a e 3.48 com excepção da Figura 3.47b. Por exemplo, para $P_{1-3}(\alpha=1)$ no caso determinístico obtêm-se 87.65MW em lugar de cerca de 80 MW. Este aspecto limita a comparação entre os dois modelos já que os valores centrais obtidos para as formulações HX não parecem ser consistentes. De qualquer forma, para a distribuição que parece apresentar valores centrais adequados no caso das formulações HX (Figura 3.47b) pode referir-se, comparativamente ao SFPP, que os modelos propostos conduziriam a fluxos de carga inviáveis quando se especifica a potência gerada na barra 1, sendo estes mais pronunciados no caso em que se realizam linearizações (HX L).

3.12 APLICAÇÃO DO CFPPF PERANTE ALTERAÇÕES DA ESTRUTURA DA REDE

Nesta secção utiliza-se o CFPPF na análise de adequação da rede, primeiro para identificar situações de inadequação (como nos exemplos anteriores das redes de 24 e 118 barras) e em seguida para experimentar alternativas e emitir conclusões. As alternativas a experimentar conduzem à alteração da estrutura da rede, concretamente a construção de novos ramos. A escolha das alternativas leva à tomada de decisões no planeamento de sistemas eléctricos, existindo um conjunto vasto de publicações nesta área, por exemplo [Ponce de Leão e Matos, 1995; 1997; Neimane e Anderson, 1999; Ivanova e Voropai, 2004].

As sugestões de reforço que se apresentam são obtidas de forma independente. O objectivo, como anteriormente, permanece a satisfação dos “pedidos razoáveis de transporte de electricidade”. Mais adiante, no Capítulo 4 será proposta uma forma diferente, consistente e sistemática de quantificar reforços na rede.

É utilizada a rede de 14 barramentos do IEEE sendo avaliada a sua adequação quantificada pela severidade de repressão para cada situação de construção de novos ramos. Os estudos que se efectuam em seguida utilizam o AC CFPPF e consideram apenas o problema das repressões de potência activa injectada. Obviamente que a análise do grau de repressão poderia também ser efectuada nos moldes enunciados anteriormente. É utilizada uma potência de base de 100 MVA.

3.12.1 Configuração da rede e resultados para a severidade de repressão, caso base

Para a rede utilizada considera-se que as potências activas e reactivas injectadas especificadas estão já disponíveis, nos cortes de nível α extremos (Tabelas 3.22 e 3.23). Consideraram-se neste estudo valores abrangentes para as bases das distribuições de possibilidade com vista a permitir evidenciar a aplicação da metodologia no caso de reforço pela construção de novos ramos.

A Tabela 3.24 mostra os valores de referência encontrados para a potência aparente (SFPF AC) da rede (valores para os cortes de nível $\alpha = 0$). A coluna mais à direita indica os valores utilizados como limite para a capacidade de transporte (CFPPF AC). Nos resultados apenas são disponibilizados os valores extremos dos cortes α .

Tabela 3.22 – Distribuições de possibilidade para a potência activa injectada especificada (pu)

	0-	1-	1+	0+
P1	0.9695	2.0915	2.5395	6.0000
P2	-0.6510	0.1213	0.2447	1.2000
P3	-2.8260	-1.0362	-0.8478	0.0000
P4	-1.4340	-0.5258	-0.4302	0.0000
P5	-0.2280	-0.0836	-0.0684	0.0000
P6	-0.3360	-0.1232	-0.1008	0.0000
P7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P9	-0.8850	-0.3245	-0.2655	0.0000
P10	-0.2700	-0.0990	-0.0810	0.0000
P11	-0.1050	-0.0385	-0.0315	0.0000
P12	-0.1830	-0.0671	-0.0549	0.0000
P13	-0.4050	-0.1485	-0.1215	0.0000
P14	-0.4470	-0.1639	-0.1341	0.0000

Tabela 3.23 – Distribuições de possibilidade para a potência reactiva injectada especificada (pu)

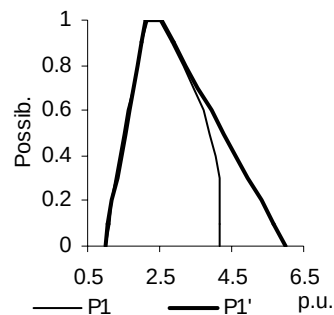
	0-	1-	1+	0+
Q1	-0.5067	-0.1858	-0.1520	0.0000
Q2	-0.2389	0.2419	0.3521	1.2719
Q3	-0.4139	0.0015	0.0863	0.7018
Q4	0.0000	0.0351	0.0429	0.1170
Q5	-0.0480	-0.0176	-0.0144	0.0000
Q6	-0.2250	0.0277	0.0671	0.3672
Q7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Q8	0.0023	0.1562	0.1909	0.5207
Q9	-0.4980	-0.1826	-0.1494	0.0000
Q10	-0.1740	-0.0638	-0.0522	0.0000
Q11	-0.0540	-0.0198	-0.0162	0.0000
Q12	-0.0480	-0.0176	-0.0144	0.0000
Q13	-0.1740	-0.0638	-0.0522	0.0000
Q14	-0.1500	-0.0550	-0.0450	0.0000

Nas condições enunciadas foram obtidas repressões para as potências activas injectadas nos barramentos 1, 3, 9 10, 12 e 14. A severidade global de repressão totaliza 1.0362 pu., sendo repartida pelos barramentos conforme Tabela 3.25 (severidade individual de repressão).

O barramento 1 (Figura 3.49) apresenta uma pequena repressão básica, não visível, à direita da distribuição de possibilidade o que constitui uma limitação da potência especificada. P_i e P_i' mantêm os significados habituais.

Tabela 3.24 - Trânsito de potência aparente (SFPF AC) sem restrição de ramos e valor utilizado para restrição dos ramos nos estudos seguintes ($S_{ik \max}$), pu

S_{ik}	0-	1-	1+	0+	$S_{ik \max}$
1-2	0.7115	1.4785	1.6908	3.8541	3.000
1-5	0.1944	0.6951	0.8194	1.7700	1.200
2-3	0.1565	0.6660	0.7999	1.6628	1.100
2-4	0.0204	0.5077	0.6172	1.5203	1.000
2-5	0.0000	0.3718	0.4592	1.2011	0.900
3-4	0.0000	0.1697	0.3007	1.2091	0.620
4-5	0.0000	0.5651	0.6981	1.6838	1.000
4-7	0.0000	0.2631	0.3295	0.9261	0.600
4-9	0.0000	0.1416	0.1804	0.5263	0.400
5-6	0.1075	0.4174	0.5015	1.2942	0.800
6-11	0.0000	0.0618	0.1009	0.4314	0.150
6-12	0.0000	0.0728	0.0907	0.2522	0.110
6-13	0.0000	0.1694	0.2133	0.5948	0.250
7-8	0.0023	0.1526	0.1855	0.4805	0.350
7-9	0.0000	0.2531	0.3206	0.9234	0.400
9-10	0.0000	0.0474	0.0893	0.4253	0.090
9-14	0.0000	0.0799	0.1228	0.4804	0.200
10-11	0.0000	0.0223	0.0592	0.3335	0.090
12-13	0.0000	0.0102	0.0256	0.1415	0.035
13-14	0.0000	0.0403	0.0774	0.3831	0.150

**Figura 3.49 – Distribuição de possibilidade para a potência injectada no barramento 1****Tabela 3.25 – Severidade individual de repressão, pu**

P_i	Sev. Individual	
	0-	0+
P1	0.0085	0.5773
P2	0.0000	0.0000
P3	0.3859	0.0000
P4	0.0000	0.0000
P5	0.0000	0.0000
P6	0.0000	0.0000
P7	0.0000	0.0000
P8	0.0000	0.0000
P9	0.0128	0.0000
P10	0.0244	0.0000
P11	0.0000	0.0000
P12	0.0069	0.0000
P13	0.0003	0.0000
P14	0.0201	0.0000
Sev. Total		1.0362

3.12.2 Alterações na rede a considerar

As acções de reforço a considerar assentam na avaliação da construção de novas linhas e novos transformadores em vários pontos da rede. Para facilidade de interpretação dos resultados, a rede de 14 barramentos foi dividida em duas zonas (A e B) que são função dos níveis de tensão da rede (Figura 3.50). Os círculos maiores representam os barramentos com maior severidade de repressão.

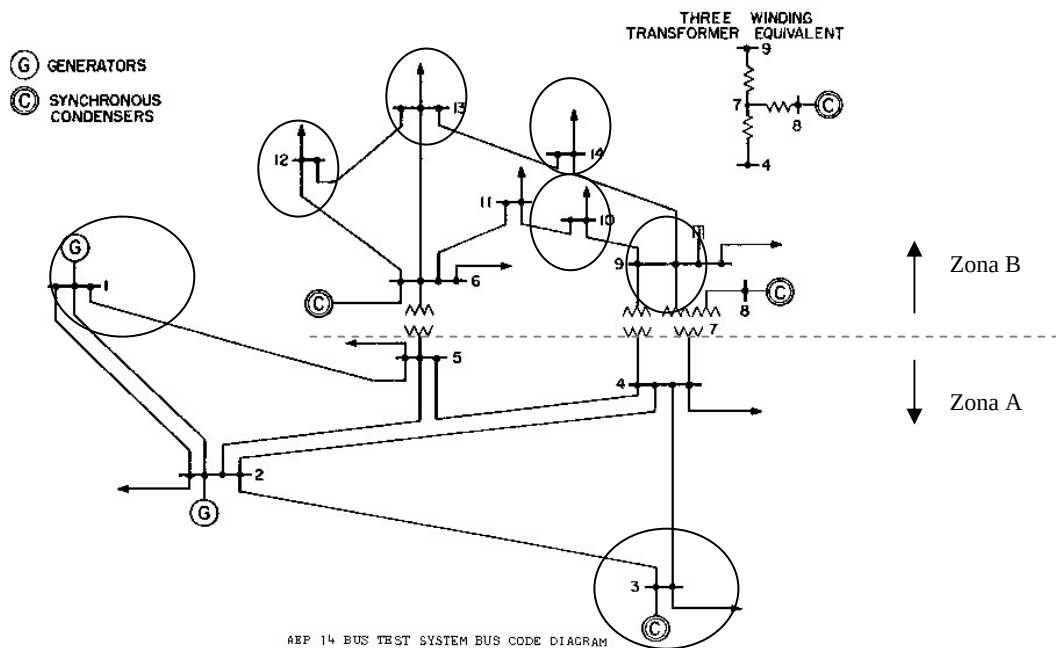


Figura 3.50 – Rede de 14 barramentos do IEEE

Foram consideradas as acções de reforço seguintes (Tabelas 3.26 e 3.27) cujos limites dos ramos são de 10 pu.

Tabela 3.26 – Ações de Reforço, novos ramos com linhas e seus dados

Linha	Rik (pu)	Xik (pu)	Ysh
1-3	0.2209	0.3480	0.0000
1-4	0.2209	0.3480	0.0000
3-5	0.2209	0.3480	0.0000
6-10	0.2209	0.3480	0.0000
6-14	0.2209	0.3480	0.0000
10-12	0.2209	0.3480	0.0000
10-14	0.2209	0.3480	0.0000
11-14	0.2209	0.3480	0.0000
12-14	0.2209	0.3480	0.0000

Tabela 3.27 – Acções de Reforço, novos ramos com transformador e seus dados

Transformador	Rik (pu)	Xik (pu)	tap
3-9	0.0000	0.62072	0.998
3-10	0.0000	0.62072	0.998
3-11	0.0000	0.62072	0.998
3-12	0.0000	0.62072	0.998
3-14	0.0000	0.62072	0.998
5-10	0.0000	0.62072	0.998

Na secção seguinte serão apresentados os resultados para cada uma das acções de reforço anteriores. Considera-se que a preocupação é com a severidade global de repressão que é de 1.0362 pu (103.6 MW).

3.12.3 Resultados para as alterações na rede

Em seguida são ilustrados os resultados das acções de reforço no que se refere à severidade individual de repressão e severidade global de repressão.

Zona A, estudo de construção de novas linhas

Tabela 3.28 – Severidade de repressão para o caso base e para as situações de reforço, zona A (pu)

Nó	caso base de restr		Construir 1-3		Construir 1-4		Construir 3-5	
	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.
P1	0.0085	0.5773	0.1360	0.6035	0.0038	0.4635	0.0443	0.5899
P2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P3	0.3859	0.0000	0.1226	0.0000	0.3978	0.0000	0.2100	0.0000
P4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P9	0.0128	0.0000	0.0128	0.0000	0.0128	0.0000	0.0129	0.0000
P10	0.0244	0.0000	0.0244	0.0000	0.0244	0.0000	0.0244	0.0000
P11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P12	0.0069	0.0000	0.0069	0.0000	0.0069	0.0000	0.0069	0.0000
P13	0.0003	0.0000	0.0003	0.0000	0.0003	0.0000	0.0003	0.0000
P14	0.0201	0.0000	0.0201	0.0000	0.0201	0.0000	0.0201	0.0000
	Sev. Rep.	1.0362	Sev. Rep.	0.9270	Sev. Rep.	0.9295	Sev. Rep.	0.9089
			Dimin. Rep.	0.1092	Dimin. Rep.	0.1067	Dimin. Rep.	0.1274

Para a zona A a melhor estratégia consiste na construção de um ramo entre os barramentos 3 e 5 pois é esta situação que apresenta menor severidade global de repressão (0.9089 pu). É interessante notar que o estabelecimento deste ramo, apesar de reduzir a severidade individual

de repressão no barramento 3 (Figura 3.51) tem o efeito contrário no barramento 1, Figura 3.52 (barramento não adjacente). No barramento 1 é ainda possível a identificação de uma repressão básica imposta pelo CFPF.

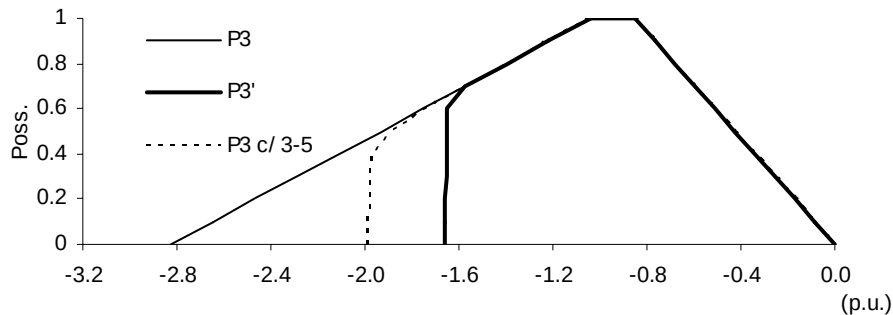


Figura 3.51 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada no barramento 3 para opção de construção do ramo 3-5

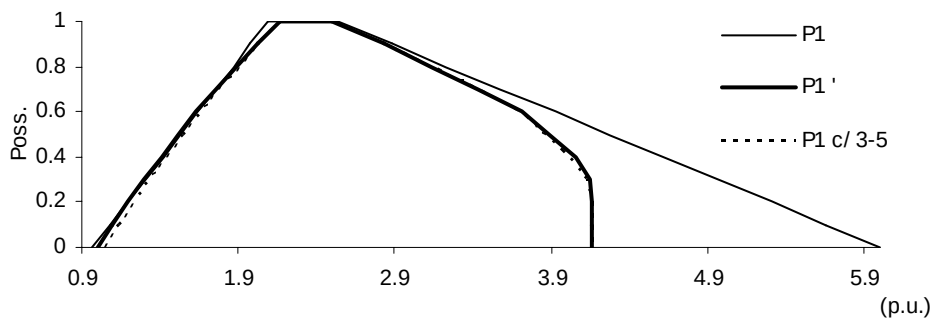


Figura 3.52 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada no barramento 1 para opção de construção do ramo 3-5

Zona B, estudo de construção de novas linhas

A situação que melhor serve a diminuição da severidade de repressão na zona B consiste na construção do ramo 6-14 (Tabela 3.29). De realçar algumas situações com interesse:

- a) a construção de 6-14 provoca a diminuição da repressão no barramento 9 e na parte direita da distribuição de possibilidade do barramento 1, ambos os barramentos não adjacentes ao novo ramo;
- b) todos os reforços efectuados na zona B exercem influência, ainda que pouca, sobre o barramento 1;
- c) a construção dos ramos 6-10, 10-12 ou 12-14 implicam o aumento da severidade individual de repressão no barramento 13 (Tabela 3.29 e Tabela 3.30).

Tabela 3.29 – Severidade de repressão para o caso base e para as situações de reforço, zona B (pu)

Nó	caso base de restr		Construir 6-10		Construir 6-14		Construir 10-12	
	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.
P1	0.0085	0.5773	0.0122	0.5725	0.0103	0.5688	0.0124	0.5776
P2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P3	0.3859	0.0000	0.3861	0.0000	0.3859	0.0000	0.3861	0.0000
P4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P9	0.0128	0.0000	0.0115	0.0000	0.0044	0.0000	0.0125	0.0000
P10	0.0244	0.0000	0.0000	0.0000	0.0244	0.0000	0.0004	0.0000
P11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P12	0.0069	0.0000	0.0069	0.0000	0.0070	0.0000	0.0000	0.0000
P13	0.0003	0.0000	0.0034	0.0000	0.0007	0.0000	0.0086	0.0000
P14	0.0201	0.0000	0.0201	0.0000	0.0000	0.0000	0.0201	0.0000
	Sev. Rep.	1.0362	Sev. Rep.	1.0126	Sev. Rep.	1.0015	Sev. Rep.	1.0177
			Dimin. Rep.	0.0236	Dimin. Rep.	0.0348	Dimin. Rep.	0.0186

Tabela 3.30 – Severidade de repressão para o caso base e para as situações de reforço, zona B (pu)

Nó	caso base de restr		Construir 10-14		Construir 11-14		Construir 12-14	
	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.
P1	0.0085	0.5773	0.0090	0.5787	0.0086	0.5742	0.0102	0.5813
P2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P3	0.3859	0.0000	0.3859	0.0000	0.3858	0.0000	0.3859	0.0000
P4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P9	0.0128	0.0000	0.0135	0.0000	0.0108	0.0000	0.0068	0.0000
P10	0.0244	0.0000	0.0112	0.0000	0.0244	0.0000	0.0244	0.0000
P11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P12	0.0069	0.0000	0.0069	0.0000	0.0069	0.0000	0.0000	0.0000
P13	0.0003	0.0000	0.0006	0.0000	0.0002	0.0000	0.0033	0.0000
P14	0.0201	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Sev. Rep.	1.0362	Sev. Rep.	1.0058	Sev. Rep.	1.0109	Sev. Rep.	1.0119
			Dimin. Rep.	0.0304	Dimin. Rep.	0.0253	Dimin. Rep.	0.0244

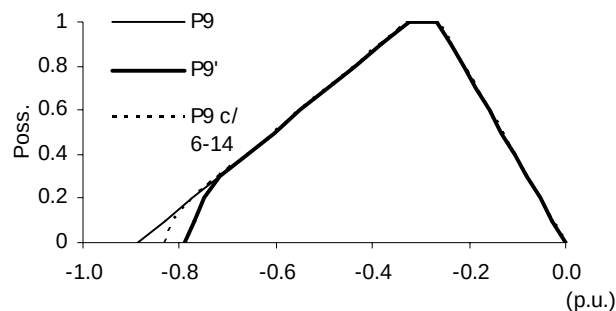


Figura 3.53 – Distribuição de possibilidade da potência activa injectada no barramento e para opção de construção do ramo 6-14

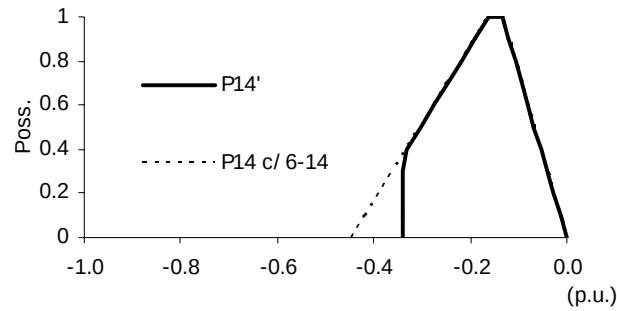


Figura 3.54 – Distribuição de possibilidade da potência activa injectada no barramento P14 e para opção de construção do ramo 6-14

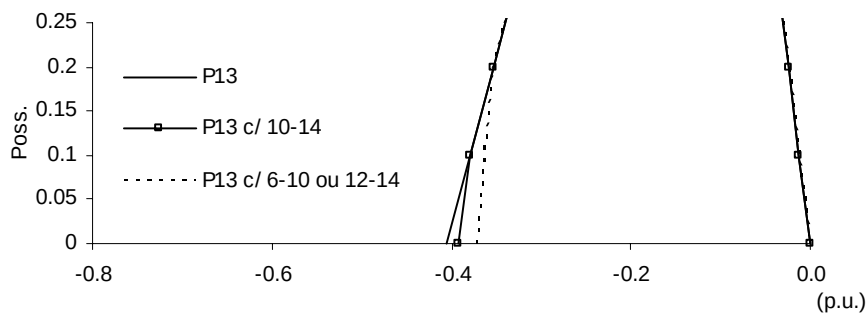


Figura 3.55 – Pormenor da distribuição de possibilidade para a potência activa injectada no barramento 13 para as opções de construção dos ramos 6-10, 10-14 e 12-14

A Figuras 3.53 e 3.54 ilustram as distribuições de possibilidade para as situações de diminuição da repressão mais relevantes quando se estuda a construção do ramo 6-14. A Figura 3.55 ilustra o pormenor do acréscimo da repressão no barramento 13 nas situações de reforço da rede correspondentes à eventual construção dos ramos 6-10, 10-12 e 12-14.

Zona A e B, estudo de construção de novas linhas

A opção de construção de uma nova linha dependerá de critérios relacionados com a adequação, critérios ambientais e critérios económicos. Se para ambas as zonas, se tivesse de optar pela construção de apenas uma linha baseado unicamente na adequação da rede, a escolha natural recairia sobre a linha 3-5 pois será esta que conduzirá à melhor adequação da rede. A Figura 3.56 ilustra as distribuições de possibilidade para os trânsitos aparentes relativas às três opções mais promissoras de construção de novas linhas.

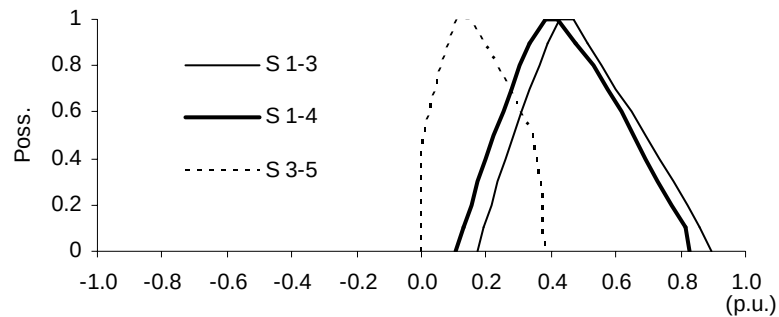


Figura 3.56 – Distribuições de possibilidade para o trânsito de potência aparente nos ramos 1-3, 1-4 e 3-5

Zona A e B, estudo de construção de novas subestações de transporte

As opções anteriores consistiram em estudar o efeito da construção de novas linhas sobre o quadro da estrutura existente no que se refere à adequação da RT. Em seguida é repetido o mesmo exercício considerando desta vez a possibilidade de construção de novas subestações.

Tabela 3.31 – Severidade de repressão para o caso base e para as situações de reforço, zona A/B (pu)

Nó	caso base de restr		Construir 3-9		Construir 3-10		Construir 3-11	
	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.
P1	0.0085	0.5773	0.0278	0.5776	0.0356	0.5801	0.0176	0.5867
P2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P3	0.3859	0.0000	0.3028	0.0027	0.3084	0.0018	0.3009	0.0051
P4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P9	0.0128	0.0000	0.0000	0.0000	0.0154	0.0000	0.0159	0.0000
P10	0.0244	0.0000	0.0244	0.0000	0.0000	0.0000	0.0244	0.0000
P11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P12	0.0069	0.0000	0.0070	0.0000	0.0071	0.0000	0.0069	0.0000
P13	0.0003	0.0000	0.0003	0.0000	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000
P14	0.0201	0.0000	0.0201	0.0000	0.0201	0.0000	0.0201	0.0000
	Sev. Rep.	1.0362	Sev. Rep.	0.9627	Sev. Rep.	0.9690	Sev. Rep.	0.9776
			Dimin. Rep.	0.0735	Dimin. Rep.	0.0673	Dimin. Rep.	0.0587

Tabela 3.32 – Severidade de repressão para o caso base e para as situações de reforço, zona A/B (pu)

Nó	caso base de restr		Construir 3-12		Construir 3-14		Construir 5-10	
	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.	Esq.	Dir.
P1	0.0085	0.5773	0.0114	0.5973	0.0125	0.5815	-0.0182	0.5740
P2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P3	0.3859	0.0000	0.3156	0.0072	0.3092	0.0000	0.3851	0.0000
P4	0.0000	0.0000	0.0027	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P6	0.0000	0.0000	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P9	0.0128	0.0000	0.0128	0.0000	0.0000	0.0000	0.0178	0.0000
P10	0.0244	0.0000	0.0244	0.0000	0.0244	0.0000	0.0000	0.0000
P11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P12	0.0069	0.0000	0.0000	0.0000	0.0072	0.0000	0.0070	0.0000
P13	0.0003	0.0000	0.0026	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0000
P14	0.0201	0.0000	0.0206	0.0000	0.0000	0.0000	0.0201	0.0000
	Sev. Rep.	1.0362	Sev. Rep.	0.9950	Sev. Rep.	0.9348	Sev. Rep.	0.9862
			Dimin. Rep.	0.0412	Dimin. Rep.	0.1014	Dimin. Rep.	0.0500

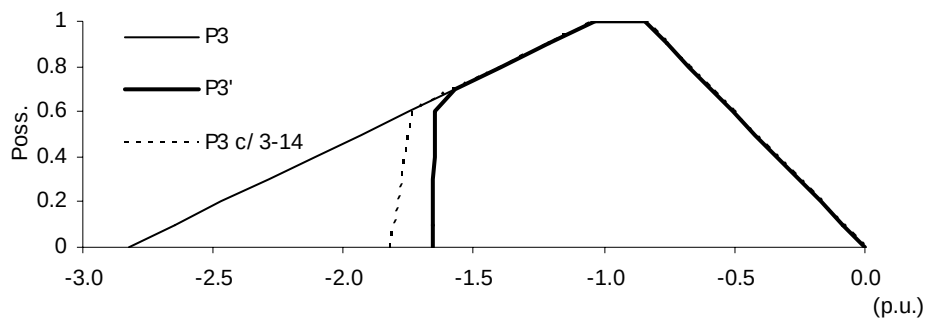


Figura 3.57 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada no barramento 3 para opção de construção do ramo 3-14

Considerando a possibilidade de construção de uma única subestação, a melhor opção será construir entre os barramentos 3 e 14 (0.9348 pu). Neste caso a severidade individual de repressão aumenta nos barramentos 1 e 12 (barras não adjacentes), diminui nos barramentos 3 (Figura 3.57) e 14 (Figura 3.58), ambas barras adjacentes. Desaparece na barra 9 (Figura 3.59) que é não adjacente.

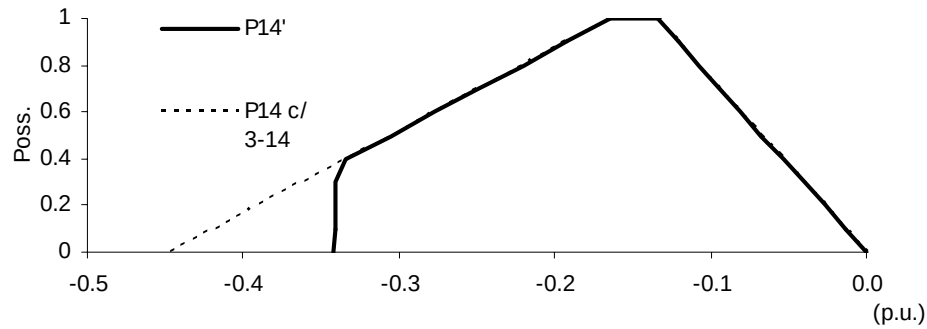


Figura 3.58 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada no barramento 14 para opção de construção do ramo 3-14

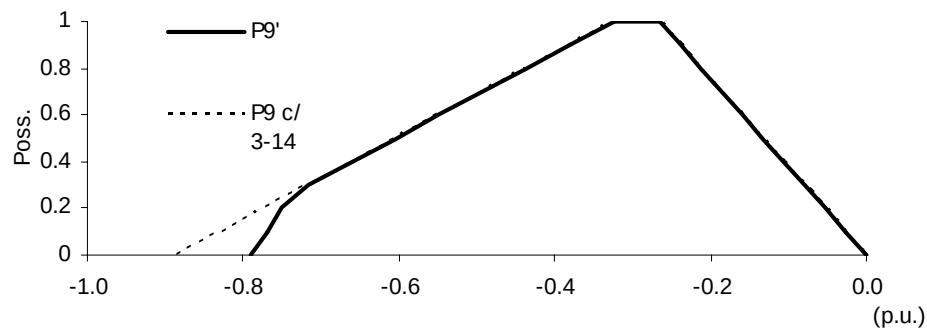


Figura 3.59 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada no barramento 9 para opção de construção do ramo 3-14

Nos barramentos 9 e 14 a severidade de repressão é totalmente eliminada. Em outras potenciais situações de reforço, como a construção do ramo 3-10, 3-11 ou 5-10, a severidade de repressão no barramento 9 vem ligeiramente aumentada. Este tipo de informação permite ter percepção do impacto do reforço de um ramo em todos os barramentos da rede, quer se trate de barramentos adjacentes quer se trate de barramentos não adjacentes. O caso do barramento 9 quando se reforça o ramo 3-14 constitui certamente um caso não esperado de diminuição da repressão.

3.12.4 Efeitos indesejados resultantes da expansão da RT

Das situações eventuais de reforço estudadas anteriormente é possível verificar a existência de situações com alteração de repressões básicas. Por exemplo, nas hipóteses de construção das linhas 1-3 (Figura 3.60) e 1-4 (Figura 3.61), o barramento 1 é influenciado na sua repressão básica. Também no caso do barramento 3 (Tabelas 3.31 e 3.32) podem ser identificadas situações de repressão básica à direita das distribuições de possibilidade.

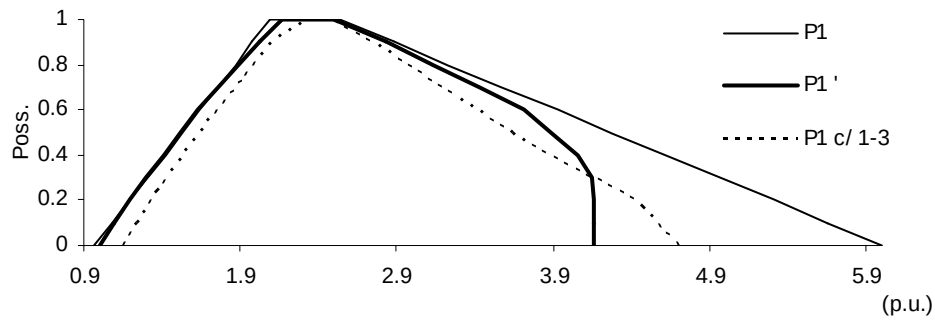


Figura 3.60 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada no barramento 1 para opção de construção do ramo 1-3

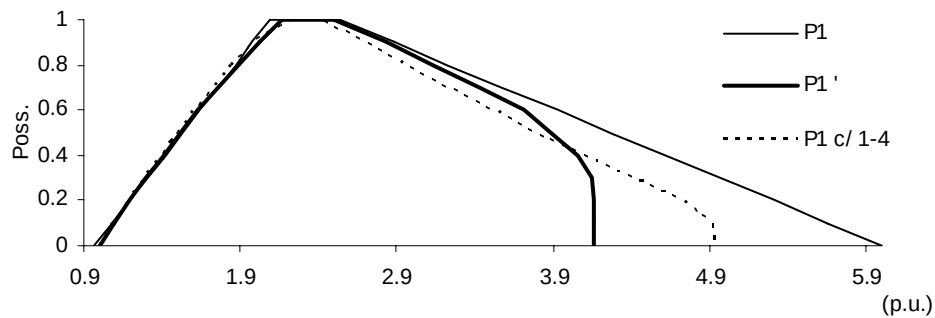


Figura 3.61 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada no barramento 1 para opção de construção do ramo 1-4

Com a introdução de um novo ramo na rede, a aplicação do CFPF pode levar alterações no valor das potências activas/reactivas especificadas. Este aspecto poderá ser revelador de efeitos indesejados como a diminuição da adequação esperada da rede (apesar da situação de reforço) ou perdas de oportunidade no que se refere a transacções no mercado eléctrico. De facto, como se pode constatar nas hipóteses de reforço estudadas, existem situações onde a repressão em determinados barramentos pode vir aumentada mesmo com a situação de reforço. Por exemplo, este é o caso do barramento 13 (Figura 3.55) ou do barramento 9 se fosse construído o ramo 5-10 (Tabela 3.32). Desta forma, a aplicação do CFPF na análise de hipóteses de expansão da rede permitirá a detecção destas situações analisando o seu efeito no que se refere à adequação da RT.

3.13 CONCLUSÕES

As metodologias clássicas de trânsito de potências difuso adoptam um barramento de compensação, podendo em alguns casos levar à produção de trânsitos de potência inviáveis quando se ultrapassam os limites de produção do gerador (situação nem sempre detectada). Por outro lado é também normal o recurso a linearizações obtendo-se valores aproximados como resultados.

A metodologia apresentada neste capítulo é diferente das versões clássicas, fundamentalmente nos seguintes aspectos:

- Trata todos os barramentos da rede da mesma forma, sendo definida uma distribuição de possibilidade para cada barramento. A incerteza é assim partilhada por todos os barramentos da rede;
- Dispensa a definição de um barramento de compensação, apenas é definido um barramento para referência dos argumentos. Neste caso qualquer barramento pode ser seleccionado (mesmo um barramento do tipo PQ). A escolha da barra de referência não se reflecte nos resultados finais dos trânsitos de potência;
- Permite a avaliação da rede de forma independente do sistema produtor;
- Não faz recurso a linearizações. Como consequência poderá conduzir a tempos de simulação mais elevados.
- Permite a inclusão dos limites técnicos da rede, assim como dos limites operacionais se desejado.

Outro aspecto importante refere-se às comparações efectuadas com outras metodologias, que apenas se limitam ao SFPP. De facto, não são conhecidos modelos publicados relativos a fluxo de cargas para situações com limites nos ramos que permitissem comparar o CFPP. Os casos conhecidos com limites nos ramos são o FOPF [Miranda e Saraiva, 1992]. Neste caso, podem evidenciar-se algumas semelhanças com o CFPP. Em concreto a inclusão de limites técnicos dos ramos ou operacionais (tensões nos barramentos PQ). O FOPF está associado, por exemplo à minimização dos custos de produção (sistema composto), mas permite a

integração de geradores de corte de carga para viabilizar a resolução do problema minimizando a potência não fornecida [Saraiva, 1992]. Neste caso obtém-se este índice sob a forma de uma distribuição de possibilidade que de alguma forma será representativo da inadequação, mas neste caso do sistema composto. Por outro lado os índices produzidos não contemplam o impacto na produção.

Finalmente, a utilização do SFPP/CFPP pode ser aplicada a estudos que se destinem a avaliar alterações na estrutura da rede resultantes de adição de novos ramos, reforço dos existentes, ou contingências como é desejado em qualquer análise com vista à expansão da rede. O primeiro assunto foi analisado neste capítulo (uma vez que consiste na aplicação directa da metodologia) e os seguintes serão tratados nos Capítulos 4 e 5, respectivamente.

MELHORIA DA ADEQUAÇÃO DA REDE DE TRANSPORTE DE ENERGIA ELÉCTRICA

4.1. INTRODUÇÃO

As metodologias apresentadas no capítulo anterior permitem determinar as repressões associadas a uma dada configuração da rede. Em ambiente de planeamento da rede, é naturalmente possível utilizar a mesma metodologia com vista a analisar diversas hipóteses de reforço ou de expansão. Contudo, este não será o processo mais eficiente, já que pode levar ao teste de inúmeras combinações de reforços com vista a melhorar a adequação da rede de transporte. O uso de *valores duais*, resultado natural dos problemas de optimização, pode constituir um bom ponto de partida para avaliação dos reforços, uma vez que estes permitirão identificar, como se verá, mais facilmente as melhores opções de reforço. Assim, com base nos valores duais, neste capítulo, será apresentada uma metodologia para identificação das melhores opções de reforço da rede. Para ilustração desta metodologia será utilizada a rede de 14 barramentos do IEEE, onde os pedidos de transporte serão modelizados com distribuições de possibilidade.

Para um dado cenário de limites nos ramos será construído um caso base. Para este caso será calculada a adequação da rede considerando o modelo DC e o modelo completo identificando-se as acções de reforço a considerar. Para o caso base será realizado um estudo onde serão analisadas detalhadamente várias situações de reforço. Em seguida serão comentados os resultados obtidos no modelo DC e no modelo completo procurando-se identificar as semelhanças e as diferenças. Neste ponto, procura-se analisar se a aplicação da metodologia proposta para melhoria da adequação utilizando o modelo simplificado (CFPF DC) pode ou não servir de indicador para o modelo completo (CFPF AC) no que se refere à identificação dos elementos mais promissores a reforçar. As conclusões encerram o capítulo.

4.2. METODOLOGIA PARA MELHORIA DE ADEQUAÇÃO DA REDE DE TRANSPORTE

Neste capítulo é apresentada uma metodologia capaz de auxiliar o estudo de planos de expansão, que permite estudar as consequências sobre a repressão da rede de transporte, após reforço de ramos. O resultado desta aplicação identifica os ramos mais promissores para reforço e permite quantificar o valor em que se devem reforçar os ramos. Como principal pressuposto considera-se que a variação da impedância do ramo aquando do reforço não é significativa. O assunto dos reforços que aqui se trata é estudado do ponto de vista dos índices de adequação, situação que constitui o caso mais complexo. Na verdade, o problema é mais elaborado porque cada reforço apresenta um determinado custo que tem de ser considerado. A consideração dos custos constitui um ponto para desenvolvimento futuro.

Adequação da rede – caso base

Para se obterem as melhores sugestões de reforço, deverão ser conhecidos os valores de adequação para a situação actual da rede, a que chamaremos de *caso base*. Este ponto corresponde à aplicação directa da metodologia proposta no Capítulo 3 (CFPF) e permite obter os índices de adequação. Procedendo à análise destes valores poderá ser realizada a sua comparação com um valor mínimo de adequação desejada para a rede. Nesta altura é possível perceber se a rede é ou não considerada adequada. Esta parte do processo nada revela de novo relativamente ao Capítulo 3.

Uso dos valores duais

No que se refere à adequação da rede foram definidos dois índices no Capítulo 3: a severidade de repressão e o grau de repressão. A aplicação directa do CFPF permite o cálculo destes índices. Uma das variáveis devolvida como resultado do CFPF (que é um problema de optimização) é o valor dual associado a cada restrição activa.

Os *valores duais* são também designados [Hill e Marques, 1999; Nash e Sofer, 1996] por *custos marginais* ou *preços sombra* e podem ser úteis para o problema de adequação da RT. O custo marginal num problema de optimização corresponde ao ganho obtido na função objectivo por alteração de uma unidade na restrição a que se refere esse custo. Seja o limite da restrição do problema a que se refere a variável dual (λ) dado por b (na sua designação inglesa RHS – *Right Hand Side*): se b aumentar de uma certa quantidade (Δb), o novo valor da função objectivo (f) virá aumentado.

$$\hat{f} = \bar{f} + \Delta b \cdot \lambda \quad (4.1)$$

A utilização dos valores duais no contexto do CFPP refere-se ao reforço de ramos e não deve ser confundida com custos marginais (€/kW/kVar), por exemplo relativos à produção de mais 1 kW/kVar [El-Keib e Ma, 1997; Jacobs, 1995] ou relativos à emissão de mais uma tonelada de CO₂. Também são conhecidas aplicações dos custos marginais no planeamento da rede considerando, por exemplo, processos iterativos de ajuda à decisão onde se procuram identificar quais os melhores planos de expansão [Braga e Saraiva, 2005] ou alocação de custos da rede através do controlo nodal dos preços da electricidade [Gil et al, 2006]. Os casos referidos não são objecto de estudo deste trabalho. Contudo, importa realçar que o uso de custos marginais no CFPP não tem a ver directamente com questões económicas mas com questões técnicas.

No contexto do CFPP o valor marginal é identificado como *reforço marginal* ou simplesmente por valor dual e representa o valor conseguido na diminuição da repressão (melhoria da adequação da rede) quando se aumenta de uma certa quantidade o limite de um dado ramo.

Valores duais no DC CFPP

De acordo com o conceito de valor dual, a diminuição da severidade de repressão (DR) em cada pedido de transporte pode ser calculada a partir de (4.2):

$$DR = \lambda \cdot \Delta P_{ik \max} \quad (4.2)$$

onde:

$\Delta P_{ik \max}$ – valor que se incrementa no limite de potência activa do ramo (reforço)

Os valores duais estão geralmente disponíveis, como parte dos resultados, nas aplicações de programação linear como o LINDO, POM para Windows, Prolin ou Solver do Excel.

Para o caso das potências activas injectadas (4.3) ter-se-á por cada nível α :

$$DR = P_i^R(\alpha) - P_i^b(\alpha) = \lambda(\alpha) \cdot \Delta P_{ik \max} \quad (4.3)$$

onde

P_i^R – potência activa injectada obtida após reforço do ramo no corte de nível α

P_i^b – potência activa injectada obtida antes do reforço do ramo no corte de nível α

O valor do reforço $\Delta P_{ik \max}$ pode ser encontrado a partir de (4.4):

$$\Delta P_{ik \max} = P_{ik}^R - P_{ik \max} = \frac{P_i^R(\alpha) - P_i^b(\alpha)}{\lambda(\alpha)} \quad (4.4)$$

Onde:

P_{ik}^R – limite ao trânsito de potência activa (após reforço do ramo) no corte de nível α

$P_{ik \max}$ – limite ao trânsito de potência activa para a restrição de ramos base (antes do reforço do ramo) no corte de nível α

No caso do modelo de optimização linear, os reforços marginais são válidos apenas para um dado intervalo (Figura 4.1). Desta forma o incremento do ramo calculado por (4.4) refere-se a um intervalo específico (por exemplo, [A,B]) que corresponde a um determinado valor dual (λ_1) que é constante ao longo desse intervalo. Nestas condições, as variações de valor dos limites dos ramos (incrementos - $\Delta P_{ik \max 1}$) apenas provocam a alteração em valor das variáveis básicas do problema de optimização, mantendo-se a base. Se o valor do limite do ramo de uma restrição específica for aumentado num valor superior aos limites do intervalo (por exemplo, $\Delta P_{ik \max 2}$) haverá mudança de base e portanto será encontrado um novo valor dual (λ_2). A este novo valor corresponderão novos intervalos [B, D] para o limite do ramo. Para este caso e para um corte de nível α , a diminuição da severidade de repressão é dada por (4.5). Ou seja, a expressão (4.3) apenas se aplicaria para o cálculo de um intervalo, neste caso [A,B].

$$DR = P_i^R(\alpha) - P_i^b(\alpha) = \lambda_1(\alpha) \cdot \Delta P_{ik \max 1} + \lambda_2(\alpha) \cdot \Delta P_{ik \max 3} \quad (4.5)$$

Generalizando, a diminuição da severidade de repressão nas situações em que o reforço do ramo compreende mais de um intervalo pode ser obtida a partir de (4.6):

$$DR = P_i^R(\alpha) - P_i^b(\alpha) = \sum_{g=1}^{p-1} \lambda_g(\alpha) \cdot \Delta P_{ik \max g} + \lambda_{g+1}(\alpha) \cdot \Delta P_{ik \max g+1} \cdot \frac{\delta}{100} \quad (4.6)$$

onde:

$\Delta P_{ik \max}$ corresponde ao intervalo total de validade de λ ; δ representa o incremento em percentagem no último intervalo considerado; p é o número total de intervalos.

No caso da Figura 4.1 δ representa o intervalo [B,C], ou seja cerca de 40% do intervalo [B,D]. Sempre que existe mudança de intervalo (mudança de base) é necessária a realização de uma pós-optimização para se conhecer a nova base.

Desta forma poderá haver lugar a algumas pós-optimizações, mas em cada intervalo pode facilmente encontrar-se qual o valor máximo de reforço (ou intermédio se desejado) e em função desse valor calcular a redução na severidade de repressão. Cada intervalo será adiante identificado como patamar. Na secção 4.4 serão fornecidos alguns exemplos.

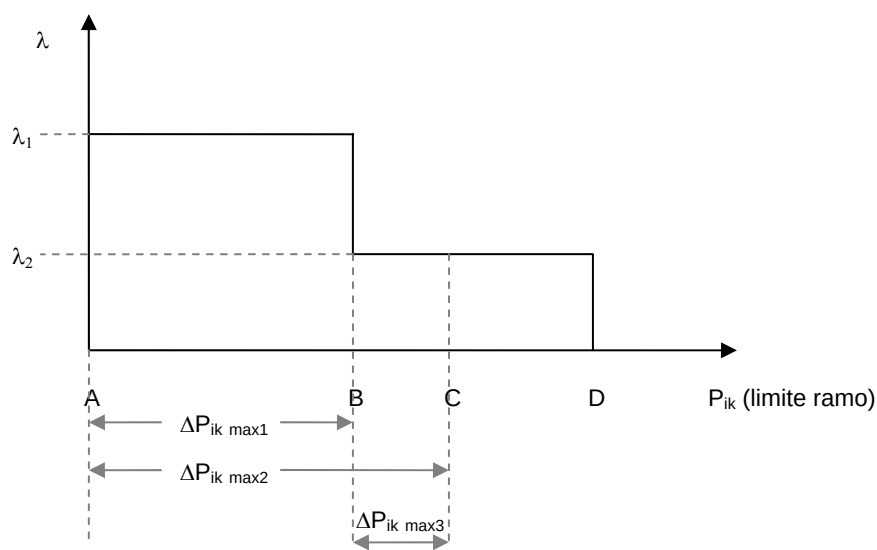


Figura 4.1 – Variação do valor dual numa restrição genérica quando se procede ao reforço sucessivo de um ramo para um corte de nível α específico

Valores duais no AC CFPP

O AC CFPP, ao contrário do DC CFPP é um problema de optimização não linear. Nestes casos, o uso de métodos de Lagrange é considerado eficiente na resolução do problema sendo as restrições adicionadas por meio dos multiplicadores de Lagrange [Bertsckas, 1999; Mordecai, 2003]. Os valores duais no caso não linear são dados pelos multiplicadores de Lagrange que são derivadas de funções não lineares. Em consequência, a evolução dos valores duais (quando se procede ao reforço dos ramos), apresenta um comportamento também não linear. No modelo AC CFPP, o reforço marginal, dado pelo multiplicador de Lagrange indica igualmente a sensibilidade da função objectivo em relação à restrição associada ao multiplicador, neste caso, na vizinhança da solução actual.

A diminuição da severidade de repressão (DR) da rede de transporte na vizinhança da solução actual é, neste caso, calculada a partir de (4.7):

$$DR = \lambda \cdot \Delta S_{ik \max} \quad (4.7)$$

onde:

$\Delta S_{ik \max}$ – valor que se incrementa no limite de potência aparente do ramo (reforço)

O valor dual (λ) em modelos de optimização não linear é devolvido como parte dos resultados em aplicações como o Tomlab, o Mosek ou o Matlab (*optimization toolbox*).

No caso da potência activa e por cada nível α , a diminuição da severidade de repressão é calculada reescrevendo (4.7) da seguinte forma:

$$DR = P_i^R(\alpha) - P_i^b(\alpha) = \lambda(\alpha) \cdot \Delta S_{ik \max} \quad (4.8)$$

Se for pretendido o cálculo da diminuição da severidade de repressão na potência reactiva, obtém-se (4.9):

$$DR = Q_i^R(\alpha) - Q_i^b(\alpha) = \lambda(\alpha) \cdot \Delta S_{ik \max} \quad (4.9)$$

onde

Q_i^R – potência reactiva injectada obtida após reforço do ramo no corte de nível α

Q_i^b – potência reactiva injectada obtida antes do reforço do ramo no corte de nível α

O valor do reforço $\Delta S_{ik \max}$ pode ser encontrado a partir de (4.10):

$$\Delta S_{ik \max} = S_{ik}^R - S_{ik \max} = \frac{P_i^R(\alpha) - P_i^b(\alpha)}{\lambda(\alpha)} \quad (4.10)$$

Onde:

S_{ik}^R – limite ao trânsito de potência aparente (após reforço do ramo)

$S_{ik \max}$ – limite ao trânsito de potência aparente para a restrição de ramos base (antes do reforço do ramo)

A questão é que o valor dual λ a que se refere o incremento (4.10), apenas é válido na vizinhança da solução actual, não sendo constante ao longo de grandes intervalos como no caso DC onde é possível a identificação de patamares lineares. A Figura 4.2 sugere o andamento não linear do valor dual no caso do incremento do limite aparente de um ramo genérico $i-k$. Como se pode constatar, o andamento dos reforços marginais não permite a identificação por intervalos. Em consequência, as expressões (4.7-4.10) apenas permitem calcular soluções exactas na vizinhança da solução actual. A não linearidade característica deste problema levará à execução de um número de pós-otimizações que tenderá a ser elevado (e pesado computacionalmente) até se obter a diminuição de repressão desejada.

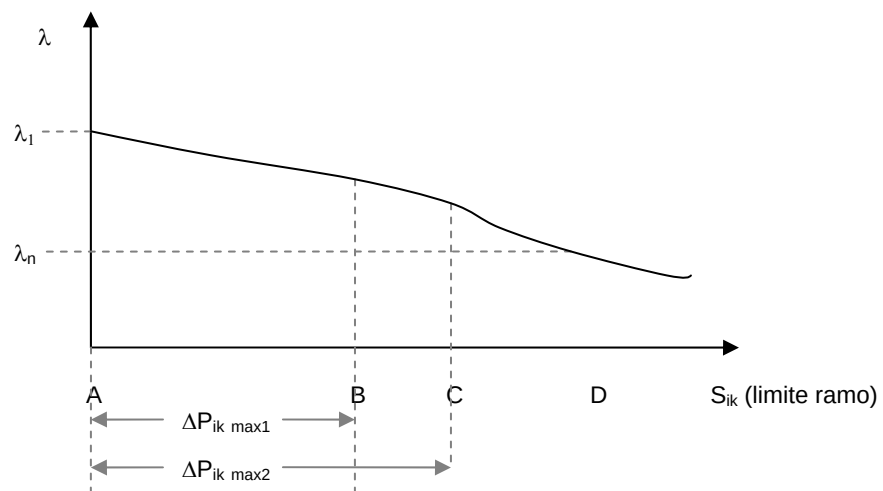


Figura 4.2 - Variação do valor dual numa restrição genérica quando se procede ao reforço sucessivo de um ramo

Este aspecto levou à definição de uma forma que permitisse obter uma indicação do valor dos reforços no caso AC sem necessidade de realizar um número elevado de pós-otimizações sucessivas:

Metodologia para cálculo da diminuição da repressão no AC CFPP

Para se diminuir a repressão num barramento específico terá de se escolher um ramo para reforçar que influencie essa repressão (restrição de limite de ramo que no problema de optimização que apresenta um valor dual diferente de zero). De referir que a apresentação da metodologia está orientada para a potência activa injectada sendo a sua aplicação à potência reactiva trivial. A metodologia será adiante denominada por *processo incremental*.

Após a escolha do ramo, normalmente o que apresenta maior valor dual no(s) barramento(s) com maior repressão, o procedimento pode ser apresentado como se indica (Figura 4.3):

a) Verificar qual o valor máximo de potência injectada permitida (P_i^{per}) se for colocado o limite do ramo num valor muito elevado; Fica-se com o conhecimento de P_i^{per} , mas desconhece-se qual o valor do reforço real (S_{ik}^{real}).

b) Em seguida resolve-se (4.10) em ordem a S_{ik}^R , onde P_i^R corresponde à potência injectada permitida e λ representa o valor dual inicial correspondente aos pontos $(S_{ik}^{\text{max}}, P_i^b)$ relativos ao caso base (rede na situação actual antes do reforço). Obtém-se desta forma um valor aproximado (S_{ik}^R) baseado no incremento artificial da variável dual.

c) Colocando o valor obtido para o limite do ramo (S_{ik}^R) no problema de optimização na respectiva restrição (restrição de $S_{ik} \leq S_{ik}^R$) e resolvendo novamente o problema, o resultado será uma nova potência injectada aproximada ($P_{i \text{ prox}}$).

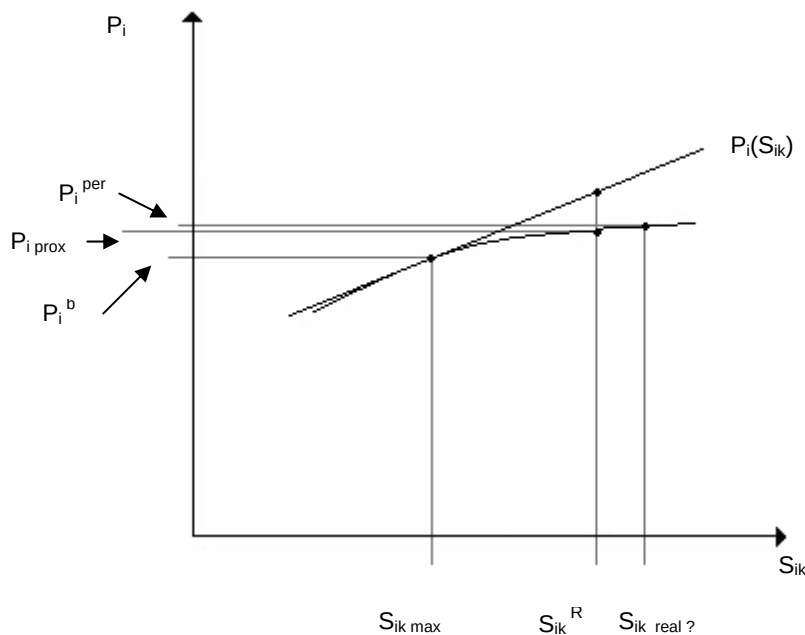


Figura 4.3 – Processo incremental

d) O responsável pelo planeamento da rede poderá não estar interessado em fazer o máximo reforço, que corresponde neste caso a $P_{i \text{ prox}}$. Assim para estimar a diminuição da severidade de repressão para um dado reforço pode ser realizada a aproximação seguinte (4.11).

$$D_R = \left(P_{i \text{ prox}}(\alpha) - P_i^b(\alpha) \right) \frac{\Delta S_{ik}}{100} \quad (4.11)$$

onde

ΔS_{ik} – reforço em percentagem do valor total a reforçar (S_{ik}) no intervalo.

Para a Figura 4.4 e para um reforço correspondente a um limite de S_{ik}' , $\Delta S_{ik} = S_{ik}' - S_{ik \text{ max}}$. O valor obtido para a potência injectada será também um valor aproximado ($E P_i$) na recta a tracejado, diferente do valor real ($C P_i$) que seria obtido a partir da curva $P_i(S_{ik})$.

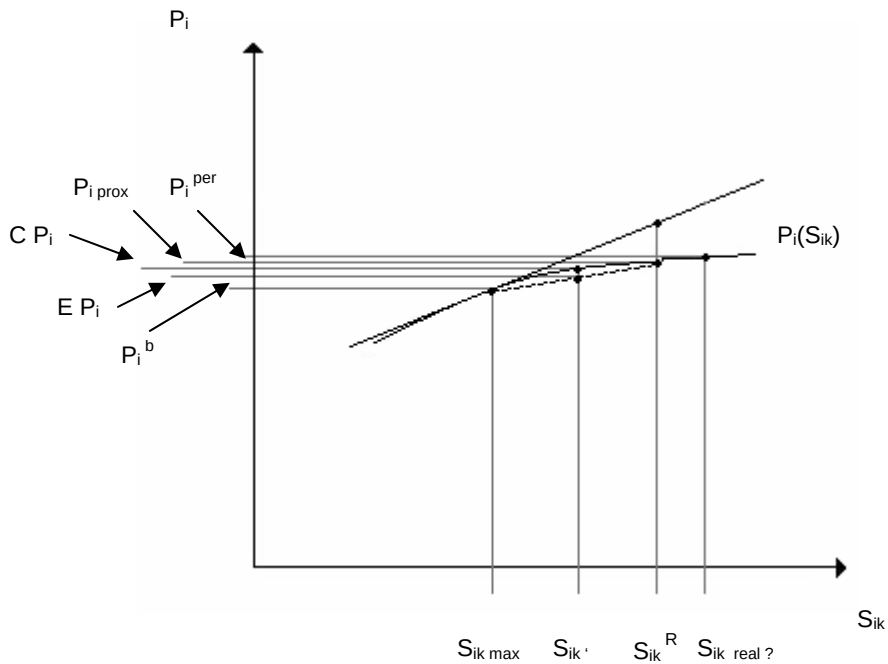


Figura 4.4 – Processo incremental, obtenção do valor aproximado da potência injectada

e) Resultados com maior precisão poderão ser obtidos com algum custo de simulação adicional. Podem ser encontrados pontos intermédios (S_{ik}'') a partir do problema de optimização. Em consequência, as aproximações produzidas (rectas a tracejado) terão um erro menor (Figura 4.5), o que corresponderá a melhor precisão dos resultados quando se usa (4.11).

O processo incremental foi testado em várias redes de teste tendo sido obtidos bons resultados ($E P_i$) comparativamente aos valores reais calculados ($C P_i$). Na secção 4.5.3 apresentam-se alguns desses resultados.

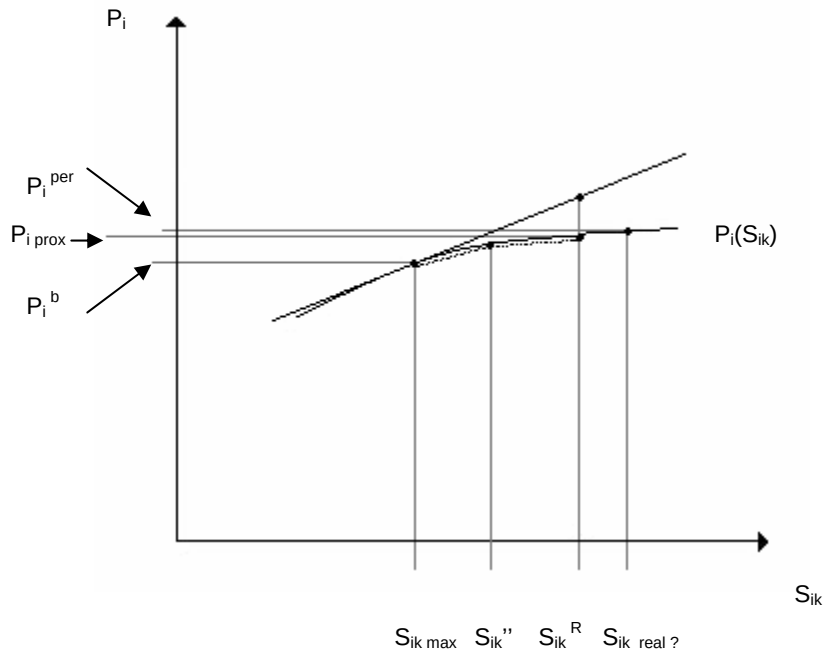


Figura 4.5 – Processo incremental, obtenção do valor aproximado da potência injectada

Estratégias de actuação baseadas no uso de valores duais

A informação dual decorrente do método de optimização aplicado no CFPF fornece indicação de quais os pontos mais interessantes a reforçar (geralmente o maior valor dual obtido para as restrições dos ramos do problema) para o corte de nível α que se estuda. Na posse desta informação, podem ser definidas diversas estratégias de reforço, por exemplo:

Estratégia A - Reduzir globalmente a severidade de repressão para um valor desejado de modo a garantir um determinado nível de adequação da rede. Neste caso existem algumas possibilidades: podem-se identificar os barramentos cuja severidade individual de repressão é maior (pois são estes barramentos que mais contribuem para a severidade global de repressão) e verificar quais os ramos cuja restrição está activa. Podem-se igualmente escolher (para reforçar) os ramos que influenciam a severidade de repressão de mais de um barramento em simultâneo (o conjunto destes barramentos pode representar uma severidade de repressão maior que o pior barramento). Em qualquer dos casos é obtida a DR por barramento. O somatório das DR para um dado reforço permite obter a DR global estimada para a rede. Como consequência natural poderá também ocorrer a diminuição do grau de repressão.

Para se concretizar esta estratégia, é necessário conhecer o corte de nível α onde actuar. A base da distribuição de possibilidade corresponde ao corte de nível $\alpha=0$. Este corte deverá ser o indicador da melhor situação de reforço. A razão para que se utilize este corte deve-se a que, geralmente, a severidade de repressão é maior na base (caso de distribuições trapezoidais ou triangulares), ou quando muito igual (distribuições rectangulares), quando comparada com os cortes α superiores (Figura 4.6). Actuar ao nível deste corte diminuirá no maior valor a severidade da repressão. Mais ainda, na maior parte dos estudos efectuados neste trabalho verificou-se que as restrições que são activas para o corte $\alpha=0$, nos cortes α mais próximos, se mantêm activas.

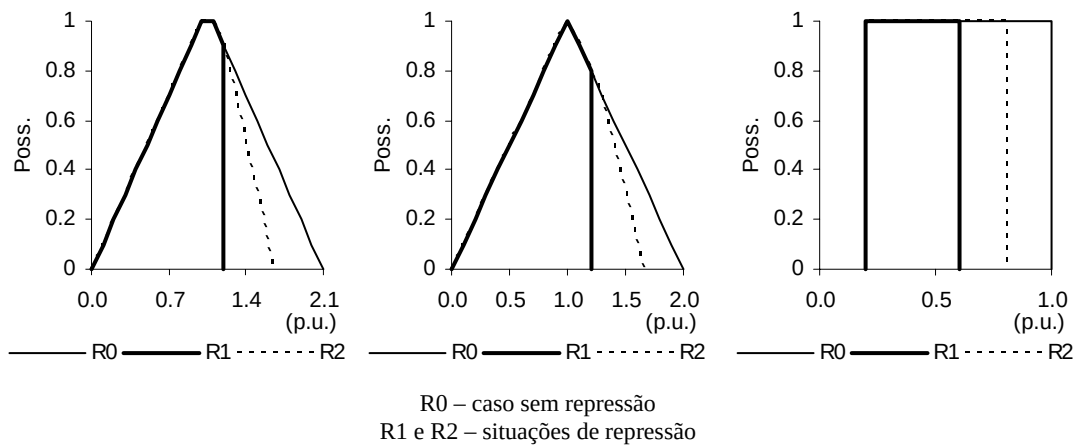


Figura 4.6 – Exemplos de repressões em distribuições de possibilidade

Os valores duais são parte dos resultados do problema de optimização. Considere-se por exemplo uma rede com 7 barramentos e 8 ramos. Nas condições actuais da rede, quatro dos barramentos (i1, i3, i5 e i6) apresentam repressão (Tabela 4.1). Os valores duais identificam os ramos cuja restrição está activa e têm consequências sobre a repressão dos barramentos. Nesta tabela, a linha “ α ” identifica se a repressão ocorre à esquerda ou à direita da distribuição de possibilidade da potência especificada. De acordo com o que se definiu para a estratégia A (actuar na severidade de repressão), a tabela a considerar será para o corte de nível $\alpha=0$.

Tabela 4.1 – Valores duais obtidos para a repressão base para os cortes α extremos (0- e 0+), caso genérico

Ramo\ Nó	barra i1	barra i3	barra i5	barra i6
i1-k1	λ_a			
i1-k4	λ_b			
i2-k4		λ_d		
i2-k5		λ_e		
i3-k4			λ_g	
i3-k5	λ_c	λ_f	λ_h	λ_i
i3-k6				
i3-k7				
α	0+	0-	0-	0-

A análise dos reforços marginais permite o seguinte:

- Identificar quais os ramos cuja restrição de limite se encontra activa (exemplo: ramo i1-k1 apresenta valor dual λ_a ;
- Em consequência de a) obter a lista de ramos congestionados que são responsáveis pela repressão em cada barramento. Por exemplo, no barramento i1, os ramos cujas restrições estão activas são: i1-k1, i1-k4, i3-k5;
- A partir do maior valor de reforço marginal, identificar o ramo que mais influenciará a repressão no barramento. Se no barramento i1 o maior valor dual for λ_c , esse ramo será, em princípio, o ramo i3-k5;
- Identificar os ramos que influenciam em simultâneo a repressão em vários barramentos. O ramo i3-k5 influencia a repressão dos barramentos i1, i3, i5 e i6.

Tanto em c) como em d) pode ser calculada a DR para todos os barramentos. Este processo é mais óbvio no caso do modelo DC CFPF uma vez que são fornecidos com o problema de optimização, os intervalos de validade dos valores duais para as restrições de ramos activas. No caso do modelo AC CFPF, a DR é calculada após utilização do processo incremental (que conduz ao cálculo de uma optimização adicional). Este é um dos motivos (além da identificação dos barramentos com repressão) pelo qual se torna importante perceber se o modelo DC CFPF dá indicações consistentes relativamente ao modelo completo.

A partir desta informação e da obtenção da DR é possível escolher o(s) ramo(s) a reforçar com vista a diminuir ou eliminar os problemas de inadequação existentes na rede de transporte.

Estratégia B - Reduzir o grau de repressão no barramento genérico i . Para se reduzir o grau de repressão é necessário conhecer a evolução dos valores duais das restrições activas nos cortes α onde se verifica o maior grau de repressão e reforçar a rede para o ramo identificado. Obviamente que ao reduzir o grau de repressão se provoca a diminuição da severidade de repressão, mas neste caso a diminuição é uma consequência de uma preocupação local com um barramento específico.

Considere-se por exemplo a informação dual referente a dois ramos congestionados que influenciam a repressão do barramento genérico i (Figura 4.7). Esta informação (resultado do problema de optimização) está disponível para os cortes de nível α entre $[0, 1]$. Se a estratégia é diminuir o grau de repressão no barramento (aproximadamente 0.9) deverá estudar-se o reforço do ramo $j-m$. De facto é este ramo que apresenta maior valor dual junto dos cortes de nível α superiores. Caso fosse pretendido reduzir a severidade individual de repressão, deveria estudar-se o reforço do ramo $i-k$ (ramo que apresenta maior valor dual junto dos cortes de nível α inferiores).

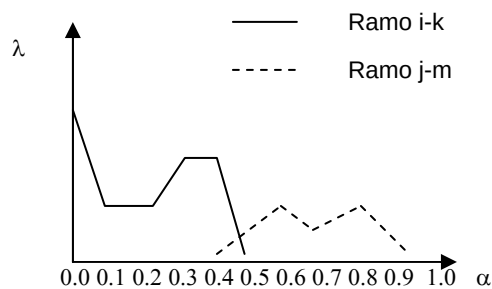


Figura 4.7 – Evolução do valor dual por corte de nível α ao longo de um barramento genérico i

Potência especificada e potência permitida

Foi anteriormente referida a potência injectada permitida (P_i^{per}), tendo sido referido que esta potência seria obtida no caso AC CFPF em situação de limite do ramo em valor muito elevado. À partida poderíamos pensar que o acto de reforçar um ramo desta forma deveria permitir obter sempre o valor da potência injectada especificada (P_i^{sp}). O que sucede é que nem sempre será assim. Servindo-nos da informação da Tabela 4.1 poderemos concluir que a repressão no barramento $i1$ é devida ao congestionamento dos ramos $i1-k1$, $i1-k4$, $i3-k5$. A escolha de um destes ramos para reforçar poderá não ser suficiente para se obter P_i^{sp} já que à partida não há garantias que os valores duais das restrições dos outros ramos desapareçam (ou

mesmo que não surjam novos valores duais em outros ramos). Neste caso, a potência injectada que se obtém com o reforço é P_i^{per} . Notar que esta situação não é exclusiva do modelo completo, podendo acontecer também para o modelo DC. Estes casos são ilustrados na Figura 4.8 para um barramento genérico 3, supondo que se procedeu ao reforço de um dado ramo.

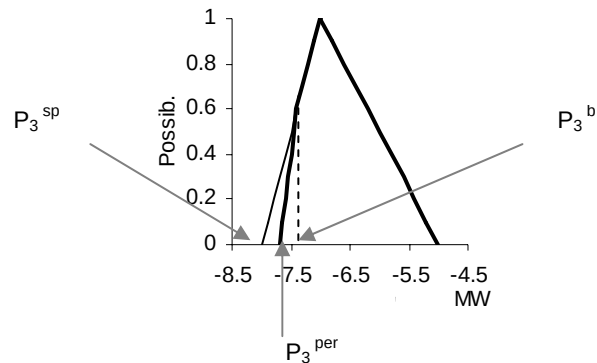


Figura 4.8 – potência especificada e potência permitida

Para se atingir a potência especificada (e considerando que não existe repressão básica), poderá haver necessidade de proceder ao reforço individual e sucessivo de vários ramos. Nas secções 4.4.3.2 (DC) e 4.5.4.2 (AC) encontram-se ilustrados alguns exemplos baseados numa rede de teste.

Sistematização da metodologia

Se fosse pretendida a implementação computacional da metodologia, poderia esta ser sistematizada de acordo com a Figura 4.9.

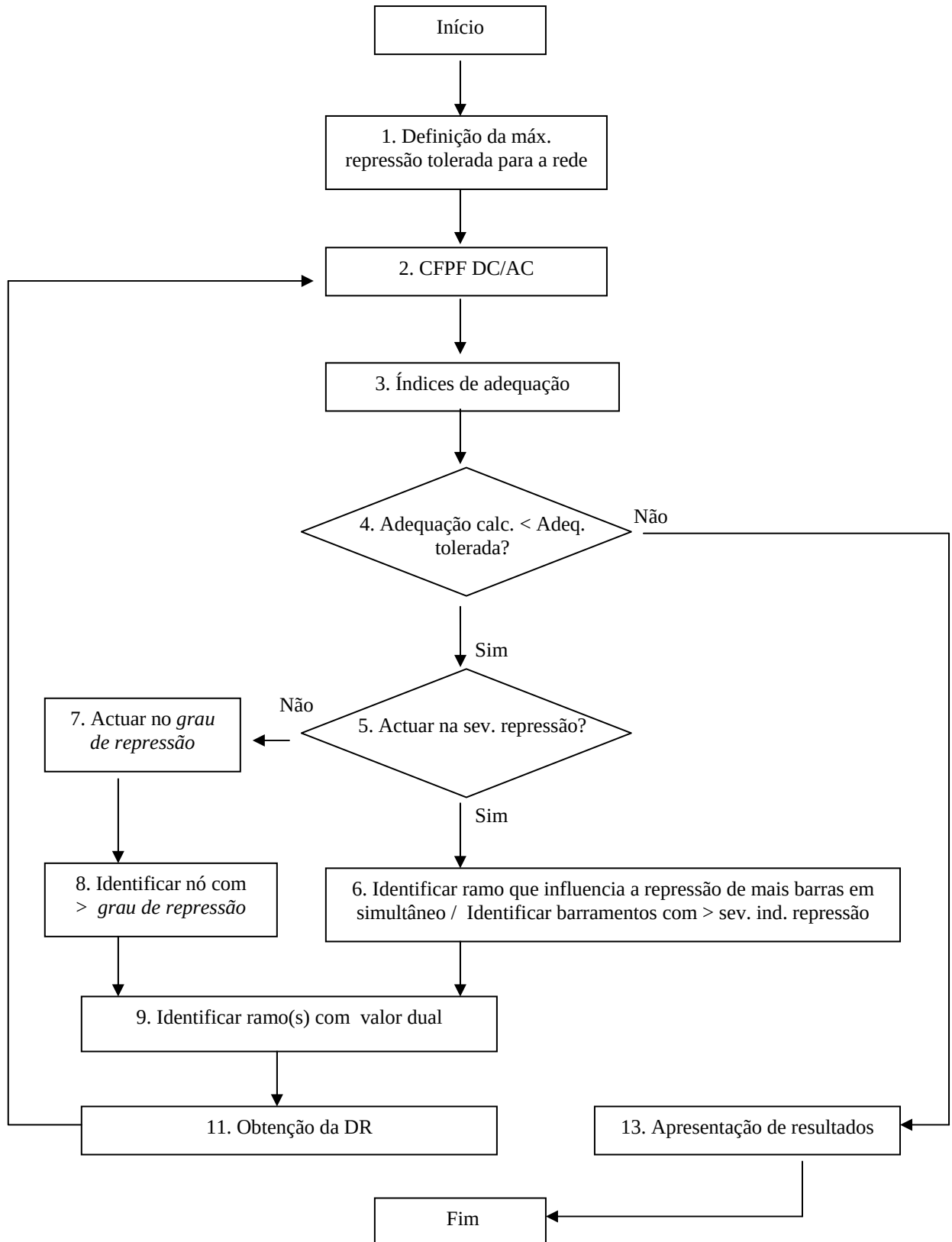


Figura 4.9 – Fluxograma para implementação computacional da metodologia de análise da adequação com sugestão de reforços dos ramos

4.3 DADOS DO CFPF - CASO BASE

Em seguida são indicados os dados a utilizar para o caso base que corresponde à situação actual da rede. Será a partir desta situação que serão analisados potenciais reforços. A rede utilizada foi a rede de 14 barramentos do IEEE já apresentada no Capítulo 3, que por clareza de exposição se repete (Figura 4.10). De forma a equilibrar mais a rede e para melhor ilustração dos conceitos, as cargas 9 a 14 foram incrementadas em 50%. Os valores característicos de α utilizados para modelizar a incerteza da produção e da carga (potências activa e reactiva) do SEE podem ser lidos na Tabela 4.2. Obviamente seriam possíveis outras caracterizações da incerteza diferenciando mais barramentos (produções por tipo de central/cargas) e potências (activa/reactiva) desde que haja informação disponível. Foi considerada uma potência de base de 100 MVA.

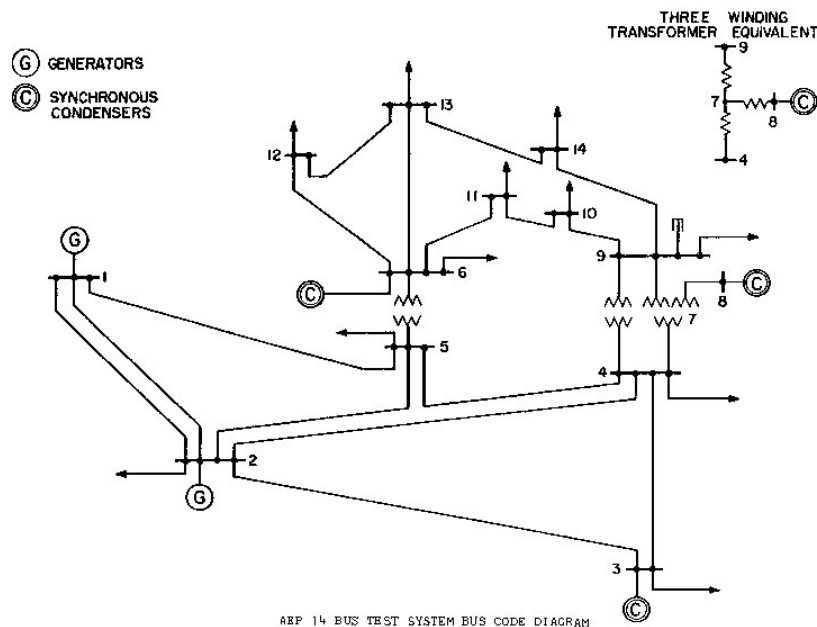


Figura 4.10 – Rede de teste IEEE 14 barramentos

Tabela 4.2 - Pontos característicos a aplicarem aos valores centrais (determinísticos) da rede de 14 barramentos

Barramentos	Modelização difusa da produção activa			
1 a 2	0.9500	0.9950	1.0050	1.0500
Modelização difusa da carga activa e reactiva				
2 a 8	0.4000	0.9900	1.0100	1.6000
9	0.0000	0.9900	1.0100	3.0000
10 e 11	0.4000	0.9900	1.0100	1.6000
12 e 13	0.0000	0.9900	1.0100	3.0000
14	0.4000	0.9900	1.0100	1.6000
Modelização difusa da produção reactiva				
1 e 2	0.9000	0.9000	1.1000	1.1000

4.4 DC CFPP NA MELHORIA DA ADEQUAÇÃO

4.4.1 Resultados para a adequação da rede aplicando o DC CFPP – CASO BASE

Em seguida, para obtenção de valores de referência, foi realizado o cálculo dos trânsitos de potência activa sem restrição aos limites dos ramos (DC SFPP), tendo-se obtido os valores da Tabela 4.3. Nesta tabela, por comodidade, os valores na coluna mais à direita representam o limite de trânsito de potência activa a utilizar nos estudos com limites nos ramos (DC CFPP).

De forma a evitar uma exposição exaustiva dos resultados, apresentam-se unicamente os resultados para os cortes de nível α extremos (0-, 1-, 1+, 0+). Os resultados completos por corte de nível α e calculados em passos de 0.1 podem ser consultados no Anexo B.

Tabela 4.3 – Distribuições de possibilidade para o trânsito de potência activa (DC SFPP) sem restrição de ramos e valor utilizado para restrição dos ramos nos estudos seguintes ($P_{ik \max}$), pu

P_{ik}	0-	1-	1+	0+	$P_{ik \max}$
1-2	1.5389	1.7150	1.7355	1.9059	1.7440
1-5	0.7062	0.8418	0.8527	0.9945	0.8600
2-3	0.4678	0.7446	0.7572	1.0291	0.7699
2-4	0.4744	0.6525	0.6629	0.8530	0.6723
2-5	0.3146	0.4953	0.5041	0.6949	0.5137
3-4	-0.5819	-0.1981	-0.1842	0.2054	0.2166
4-5	-0.9879	-0.6976	-0.6834	-0.3129	0.7111
4-7	0.0408	0.4268	0.4362	0.9489	0.4618
4-9	0.0234	0.2449	0.2503	0.5445	0.2647
5-6	0.1399	0.5747	0.5861	1.1491	0.6134
6-11	-0.1363	0.0953	0.1000	0.3531	0.1112
6-12	0.0060	0.1124	0.1148	0.3046	0.1242
6-13	0.0209	0.2543	0.2599	0.6442	0.2783
7-8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.0000
7-9	0.0408	0.4268	0.4362	0.9489	0.4617
9-10	-0.2018	0.0869	0.0928	0.3589	0.0955
9-14	-0.1192	0.1439	0.1497	0.4336	0.1633
10-11	-0.2995	-0.0475	-0.0428	0.1873	0.0598
12-13	-0.1264	0.0210	0.0233	0.1686	0.0652
13-14	-0.1805	0.0743	0.0792	0.3126	0.0902

As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam os resultados, respectivamente para os casos seguintes: potência activa injectada nos barramentos e trânsito de potência activa nos ramos com restrição (DC CFPP).

Tabela 4.4 - Distribuições de possibilidade para a potência activa injectada, modelo DC CFPF com limites nos ramos (pu)

P_i'	0-	1-	1+	0+
1	2.4439	2.5596	2.5854	2.6040
2	0.0328	0.1788	0.1872	0.3332
3	-0.9865	-0.9514	-0.9326	-0.3768
4	-0.7648	-0.4828	-0.4732	-0.1912
5	-0.1216	-0.0768	-0.0752	-0.0304
6	-0.1792	-0.1131	-0.1109	-0.0448
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	-0.7086	-0.4469	-0.4381	-0.0073
10	-0.1553	-0.1363	-0.1337	-0.0540
11	-0.0840	-0.0530	-0.0520	-0.0210
12	-0.1894	-0.0924	-0.0906	0.0000
13	-0.3956	-0.2045	-0.2005	0.0000
14	-0.2535	-0.2257	-0.2213	-0.0894

Para os limites dos ramos indicados na Tabela 4.3, pode verificar-se a existência de congestionamentos nos ramos (Tabela 4.5). Foram identificadas sete situações de repressão representadas nas Figuras 4.11 a 4.13 onde P_i e P_i' representam, respectivamente, a potência activa injectada especificada e a potência activa injectada calculada (CFPF). Os barramentos 3, 9, 10, 12, 13 e 14 configuram situações de repressão na carga. Já a repressão no barramento 1 refere-se a uma repressão de produção.

Tabela 4.5 – Distribuições de possibilidade para o trânsito de potência activa (CFPF DC) com restrição de limites nos ramos (pu)

P_{ik}'	0-	1-	1+	0+	$P_{ik \max}$
1-2	1.6150	1.7150	1.7355	1.7440	1.7440
1-5	0.7702	0.8418	0.8527	0.8600	0.8600
2-3	0.4854	0.7446	0.7572	0.7699	0.7699
2-4	0.5588	0.6525	0.6629	0.6723	0.6723
2-5	0.4183	0.4953	0.5041	0.5137	0.5137
3-4	-0.2166	-0.1981	-0.1842	0.1191	0.2166
4-5	-0.7111	-0.6976	-0.6834	-0.4981	0.7111
4-7	0.1691	0.4268	0.4362	0.4613	0.4618
4-9	0.0970	0.2449	0.2503	0.2647	0.2647
5-6	0.3558	0.5747	0.5861	0.6134	0.6134
6-11	-0.0205	0.0953	0.1000	0.1112	0.1112
6-12	0.0145	0.1124	0.1148	0.1242	0.1242
6-13	0.0490	0.2543	0.2599	0.2783	0.2783
7-8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7-9	0.1691	0.4268	0.4362	0.4613	0.4617
9-10	-0.0058	0.0869	0.0928	0.0955	0.0955
9-14	0.0084	0.1439	0.1497	0.1633	0.1633
10-11	-0.0598	-0.0475	-0.0428	0.0415	0.0598
12-13	-0.0652	0.0210	0.0233	0.0652	0.0652
13-14	-0.0521	0.0743	0.0792	0.0902	0.0902

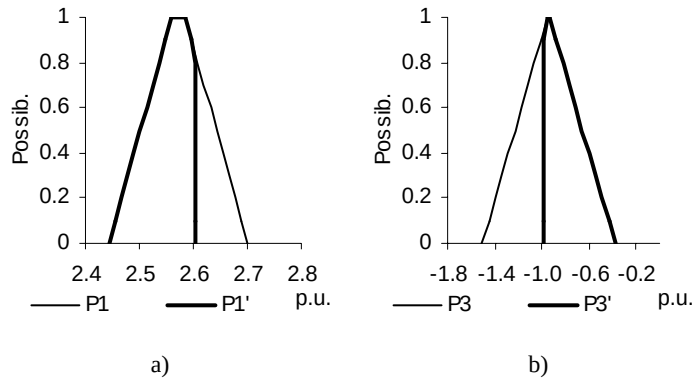


Figura 4.11 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada nos barramentos 1 (a) e 3 (b)

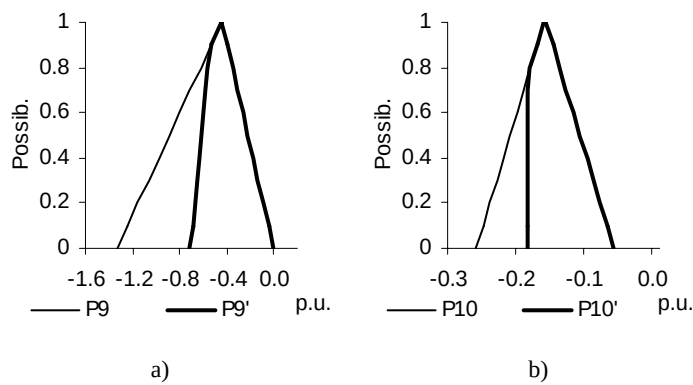


Figura 4.12 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada nos barramentos 9 (a) e 10 (b)

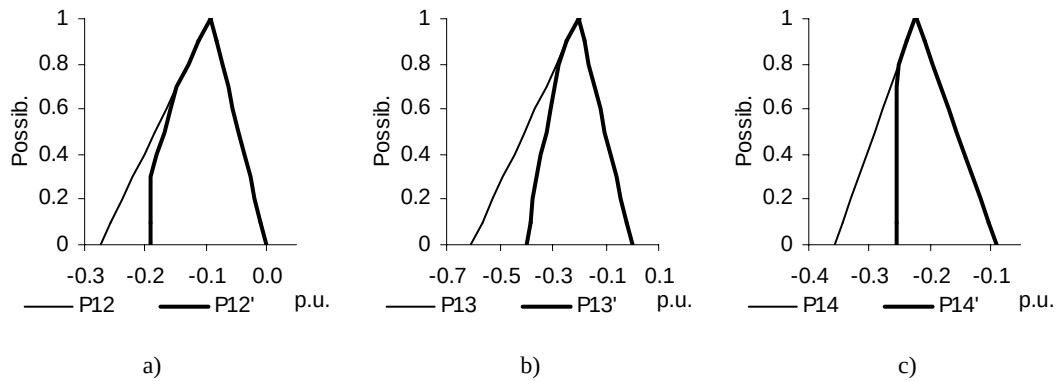


Figura 4.13 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada nos barramentos 12 (a), 13 (b) e 14 (c)

O barramento 9 apresenta a maior severidade individual de repressão (27.82 MW) que representa 38% da severidade global de repressão (73.57 MW - cerca de um quarto da carga). O grau de repressão da rede é máximo sendo dado pelo barramento 3. Como se pode constatar por análise da Tabela 4.6 no corte $\alpha=0.9$ já existe repressão.

Tabela 4.6 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada no barramento 3

Barra	0.0 (pu)	0.9 (pu)	1.0 (pu)	1.0 (pu)	0.0 (pu)
P_3	-1.5072	-1.0070	-0.9514	-0.9326	-0.3768
P_3'	-0.9865	-0.9865	-0.9514	-0.9326	-0.3768

Na Tabela 4.7 podem ser observados os valores duais obtidos para o caso base para o corte de nível $\alpha=0$ para o DC CFPF. É agora possível identificar quais os ramos causadores de repressão nos barramentos. Por exemplo no barramento 13, a repressão é influenciada pelos ramos 6-13, 9-10 e 12-13.

Tabela 4.7 – Valores duais obtidos para a repressão base DC CFPF e para os cortes α extremos (0- e 0+)

Ramo/nó	barra 1	barra 3	barra 9	barra 10	barra 12	barra 13	barra 14
1-2	1.0000						
1-5	1.0000						
2-3		1.0000					
4-3		1.0000					
4-9			2.4526				
6-11			0.5608				
6-12					1.0000		
6-13						1.2107	
9-10				1.0000		0.7689	
9-14							1.0000
11-10			1.5857	1.0000			
12-13						1.0000	
13-12					1.0000		
13-14							1.0000
α	0+	0-	0-	0-	0-	0-	0-

4.4.2 Evolução dos valores duais

Nos modelos lineares o valor dual de uma restrição permanece constante durante um determinado intervalo. Se forem efectuadas pós-optimizações poderão ser identificados novos intervalos (Figura 4.1). Este assunto foi introduzido na secção 4.2. Em seguida é ilustrada a variação do valor dual no modelo linear com um exemplo baseado na rede de teste.

A análise da Tabela 4.7 permite uma indicação dos ramos mais promissores a reforçar, não do valor do reforço. Para se conhecerem completamente as potencialidades de um reforço é necessário conhecer os valores duais e respectivos patamares (intervalos).

Por exemplo, no barramento 9 (Tabela 4.7), um dos ramos que influencia a sua repressão é o 6-11 com um valor dual de 0.5608 (corte $\alpha=0$). A Tabela 4.8 mostra a evolução dos valores

duais (corte $\alpha=0$) por intervalos de $P_{ik \max}$ assim como o valor da potência activa injectada no barramento 9 para os limites desses intervalos. De referir que no caso base o valor limite do ramo 6-11 era 0.1112 pu ($P_9=-0.7086$ pu). Para se conseguirem obter os patamares referidos houve lugar a três pós-optimizações. Para clareza de exposição, os resultados seguintes são apenas relativos aos cortes de nível α extremos (0- e 0+), conforme informação fornecida pela Tabela 4.7. A Figura 4.14 ilustra graficamente a evolução do valor dual em função do reforço do ramo ($P_{6-10 \max}$). A variação dos valores de P_9 nos intervalos da Tabela 4.8 é naturalmente linear.

Tabela 4.8 – Evolução dos valores duais no corte $\alpha=0$ e repressão na barra 9 em função do reforço do ramo 6-11

$P_{6-11 \max}$ (pu)	P_9 (pu)	λ
0.1018	-0.7033	0.5605
0.1123	-0.7092	
0.1123	-0.7092	0.4471
0.1290	-0.7167	
0.1290	-0.7167	0.4454
0.1437	-0.7232	
0.1437	-0.7232	0.0000
0.1440	-0.7233	

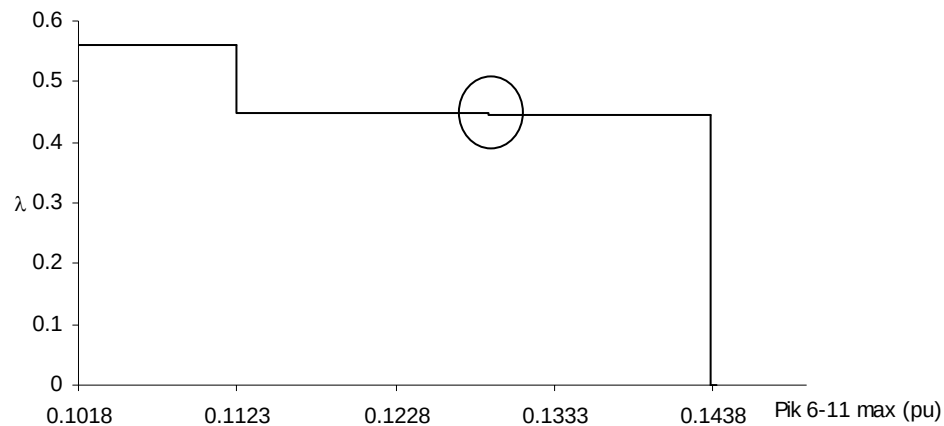


Figura 4.14 – Evolução dos valores duais e diminuição da repressão no barramento 9 em função do reforço do ramo 6-11

4.4.3 Estudo de caso

4.4.3.1 Identificação de opções para reforço da rede e sua simulação

A adequação da rede pode ser melhorada através de estratégias já definidas actuando a nível local e/ou global. Para levar a efeito as estratégias de melhoria da adequação terão de ser conhecidos os valores de reforço dos ramos.

Na análise de sensibilidade que se realiza no seguimento considera-se uma estratégia A (secção 4.2) que consiste em diminuir a severidade global de repressão da rede de transporte. O procedimento utilizado foi para cada barramento com repressão, identificar quais os ramos que mais influenciam essa repressão. Cada um destes ramos constitui uma hipótese de reforço a ser estudada que foi denominada por *acção de reforço* (AR). Tratando-se da severidade de repressão e pelos motivos apontados na secção 4.2 foi considerado o corte $\alpha=0$ para identificar as situações de reforço mais promissoras. Em seguida é calculada a severidade de repressão da rede para cada AR identificada.

Como referido (Tabela 4.10), os barramentos com repressão de potência activa injectada são: 1, 3, 9, 10, 12, 13 e 14.

Neste caso de estudo considerou-se que:

- a) se pretendem conhecer completamente as potencialidades de cada reforço;
- b) o estudo de todas as AR identificadas.

No que se refere à alínea a) importa referir que a identificação do primeiro patamar será (por exemplo, Figura 4.14 para o barramento 9), na maior parte das situações (Tabela 4.9) suficiente para determinar o efeito do reforço. Contudo e também com a finalidade de permitir mais tarde a comparação com o processo incremental para o modelo completo, optou-se por considerar que o objectivo é a máxima diminuição da severidade de repressão permitida pelo reforço completo (valor dual nulo para a restrição activa). No cálculo da diminuição da repressão far-se-á recurso a (4.3) para os reforços que apenas devolvem um patamar e a (4.6) para situações de reforço envolvendo mais de um patamar (Figura 4.1).

No segundo caso, estudar todas as AR pode levar a um conjunto de simulações elevado em sistemas de dimensão real. O procedimento normal não será este, mas a simulação da AR que sugira colectivamente a maior diminuição da severidade de repressão.

A Tabela 4.9 disponibiliza para o corte $\alpha=0$, a seguinte informação:

- Barramentos afectados (com repressão);
- Valores duais nos vários patamares para as restrições activas;
- Valores da potência injectada para o caso base (P_i^b) e final (P_i^R);
- A diminuição da severidade de repressão (DR) no nível $\alpha=0$ com o reforço do ramo respectivo;
- Limites iniciais ($P_{ik \max}$) e finais (P_{ik}^R) para os ramos;
- Incrementos a realizar na capacidade de transporte para o corte α referido;

As variáveis em uso estão identificadas na secção 4.2.

Tabela 4.9 – Valores de λ para a repressão base, diminuição de repressão conseguida ($\alpha=0$) e aumento do limite da capacidade de transporte quando se reforça apenas o ramo em estudo (pu)

Nó	Reforço	λ			P_i ($\alpha=0$)			ΔP_{ik}		
		Patamar 1	Patamar 2	Patamar 3	P_i^b	P_i^R	DR $^*_1$	$P_{ik \max}$	P_{ik}^R	Difer.
1	R 1-2 AR1	1.0000	-----	-----	2.6040	2.7009	0.0969	1.7440	1.8409	0.0969
1	R 1-5	1.0000	-----	-----	2.6040	2.6071	0.0031	0.8600	0.8632	0.0032
3	R 2-3	1.0000	-----	-----	-0.9865	-1.0025	0.0160	0.7699	0.7860	0.0161
3	R 3-4 AR2	1.0000	-----	-----	-0.9865	-1.1178	0.1313	0.2166	0.3479	0.1313
9	R 4-9	2.4526	-----	-----	-0.7086	-0.7091	0.0005	0.2647	0.2649	0.0002
9	R 6-11	0.5608	0.4471	0.4454	-0.7086	-0.7233	0.0147	0.1112	0.1440	0.0328
9	R 10-11 AR3	1.5857	1.5023	1.5000	-0.7086	-0.7543	0.0458	0.0598	0.0905	0.0307
9	R 12-13	0.1091	-----	-----	-0.7086	-0.7087	0.0001	0.0652	0.0664	0.0012
10	R 9-10 AR4	1.0000	-----	-----	-0.1553	-0.2160	0.0607	0.0955	0.1562	0.0607
10	R 10-11	1.0000	-----	-----	-0.1553	-0.1857	0.0304	0.0598	0.0902	0.0304
12	R 6-12 AR5	1.0000	-----	-----	-0.1894	-0.2579	0.0685	0.1242	0.1927	0.0685
12	R 12-13	1.0000	-----	-----	-0.1894	-0.2228	0.0334	0.0652	0.0986	0.0334
13	R 6-13 AR6	1.2107	-----	-----	-0.3956	-0.4750	0.0795	0.2783	0.3578	0.0795
13	R 9-10	0.7689	0.1366	-----	-0.3956	-0.4174	0.0218	0.0955	0.1710	0.0755
13	R 12-13	1.0000	-----	-----	-0.3956	-0.4099	0.0144	0.0652	0.0795	0.0143
14	R 9-14 AR7	1.0000	-----	-----	-0.2535	-0.3576	0.1041	0.1633	0.2674	0.1041
14	R 13-14	1.0000	-----	-----	-0.2535	-0.3374	0.0839	0.0902	0.1741	0.0839

A diferença " $^*_1$ " é calculada em termos do intervalo $\alpha = [0, 0_+]$. Serve apenas como indicador da melhor situação de reforço para este corte de nível α , que como se referiu, corresponde geralmente ao maior contributo para a diminuição da severidade de repressão.

Nesta tabela estão salientadas as maiores diminuições de repressão para cada barramento. As opções de reforço mais promissoras de acordo com o procedimento indicado correspondem ao estudo do reforço dos ramos 1-2, 3-4, 10-11, 9-10, 6-12, 6-13 e 9-14. Entre essas AR, e pela agregação das DR por cada ramo, a melhor opção é a AR 3-4 (0.1313 pu).

Tendo sido observada a validade dos intervalos duais com vista à máxima diminuição da severidade de repressão no corte α em estudo, foram obtidos os valores para a severidade e grau de repressão da rede para cada acção de reforço identificada (Tabelas 4.11 e 4.12). Os valores salientados indicam as alterações verificadas para a severidade de repressão individual (no barramento) e no grau de repressão relativamente ao caso base. Com vista a facilitar a comparação, a informação do caso base é detalhada na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Valores obtidos para a severidade individual e global de repressão (pu) e para o grau de repressão, caso base

Nó	Sev. Rep	Grau Rep.
P1	0.0397	0.9
P2	0.0000	0.0
P3	0.2446	1.0
P4	0.0000	0.0
P5	0.0000	0.0
P6	0.0000	0.0
P7	0.0000	0.0
P8	0.0000	0.0
P9	0.2782	0.9
P10	0.0232	0.8
P11	0.0000	0.0
P12	0.0231	0.7
P13	0.0857	0.9
P14	0.0412	0.8
Sev. Total	0.7357	pu

Um aspecto interessante é o facto da repressão no barramento 12 surgir influenciada quando se reforça 3-4 ou 9-10 (ramos não adjacentes). Para se perceber o motivo pelo qual esta situação acontece, bastará analisar no caso base, a evolução dos valores duais ao longo dos cortes de nível α para o barramento em causa (Figura 4.15). Com efeito, o ramo 3-4 influencia a repressão do barramento 12 entre os cortes de nível α 0.3 a 0.6 e o ramo 9-10 exerce influência entre os cortes de nível α 0.3 a 0.7. Esta situação não está visível na Tabela 4.7, que apenas identifica os valores duais ao nível do corte $\alpha=0$.

Tabela 4.11 – Valores obtidos para a severidade individual e global de repressão (pu) e para o grau de repressão, acções de reforço 1 a 4

Nó	Acção Reforço 1 Reforço de 1-2		Acção Reforço 2 Reforço de 3-4		Acção Reforço 3 Reforço de 10-11		Acção Reforço 4 Reforço de 9-10	
	Sev. Rep	Grau Rep.	Sev. Rep	Grau Rep.	Sev. Rep	Grau Rep.	Sev. Rep	Grau Rep.
P1	0.0000	0.0	0.0397	0.9	0.0397	0.9	0.0397	0.9
P2	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P3	0.2446	1.0	0.1747	0.9	0.2446	1.0	0.2446	1.0
P4	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P5	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P6	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P7	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P8	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P9	0.2782	0.9	0.2778	0.9	0.2561	0.9	0.2778	0.9
P10	0.0232	0.8	0.0232	0.8	0.0095	0.7	0.0000	0.0
P11	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P12	0.0231	0.7	0.0230	0.7	0.0231	0.7	0.0228	0.7
P13	0.0857	0.9	0.0857	0.9	0.0857	0.9	0.0729	0.9
P14	0.0412	0.8	0.0412	0.8	0.0412	0.8	0.0412	0.8
Sev. Total	0.6960	pu	0.6653	pu	0.6999	pu	0.6990	pu

Tabela 4.12 – Valores obtidos para a severidade individual e global de repressão (pu) e para o grau de repressão, acções de reforço 5 a 7

Nó	Acção Reforço 5 Reforço de 12-13		Acção Reforço 6 Reforço de 6-13		Acção Reforço 7 Reforço de 9-14	
	Sev. Rep	Grau Rep.	Sev. Rep	Grau Rep.	Sev. Rep	Grau Rep.
P1	0.0397	0.9	0.0397	0.9000	0.0397	0.9
P2	0.0000	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0
P3	0.2446	1.0	0.2446	1.0000	0.2446	1.0
P4	0.0000	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0
P5	0.0000	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0
P6	0.0000	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0
P7	0.0000	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0
P8	0.0000	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0
P9	0.2782	0.9	0.2782	0.9000	0.2778	0.9
P10	0.0232	0.8	0.0232	0.8000	0.0232	0.8
P11	0.0000	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0
P12	0.0008	0.1	0.0231	0.7000	0.0231	0.7
P13	0.0857	0.9	0.0311	0.5000	0.0857	0.9
P14	0.0412	0.8	0.0412	0.8000	0.0000	0.0
Sev. Total	0.7134	pu	0.6811	pu	0.6941	pu

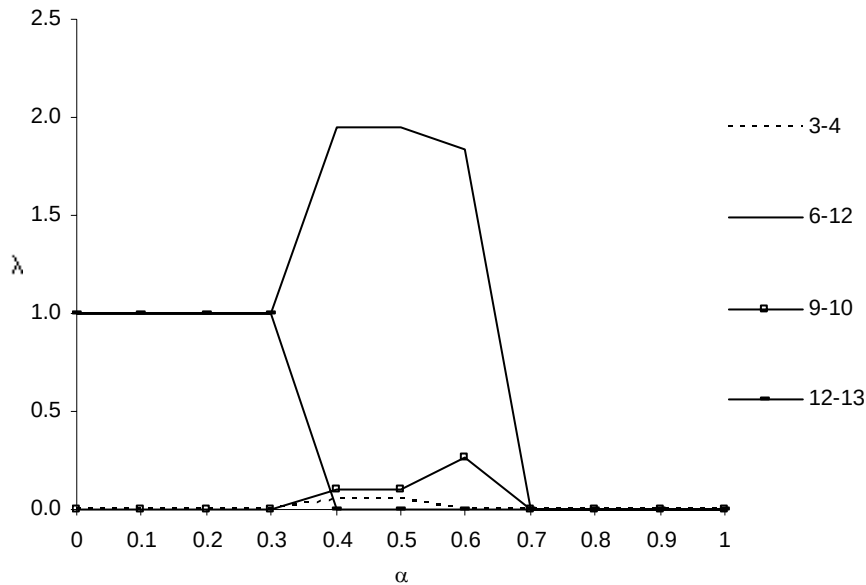


Figura 4.15 – Evolução dos valores duais das restrições de ramos activos ao longo dos cortes de nível α a variar entre [0, 1], barramento 12

Uma outra conclusão relevante refere-se ao reforço de ramos que estão adjacentes a determinados barramentos, não exercerem grande influência sobre a repressão destes (por exemplo, o reforço do ramo 9-10 não exerce influência significativa sobre o barramento 9). Como se constata (Tabelas 4.11 e 4.12) e considerando uma oportunidade de reforço, a melhor opção confirma a escolha do ramo 3-4 (severidade global de repressão de 66.53MW e o grau de repressão de 0.9).

4.4.3.2 Potência permitida e potência especificada

Na secção 4.2 foi clarificada a diferença entre as potências injectadas especificadas e as potências injectadas permitidas. De facto, o reforço de um ramo mesmo num valor muito elevado pode não permitir eliminar completamente a repressão num barramento (e em geral na rede) de modo a se poder obter a potência especificada. Neste caso o que se obtém é a potência permitida. Um destes casos corresponde ao barramento 9 que apresenta uma potência especificada de carga para o corte de nível $\alpha=0$ de -1.3275 pu. O reforço de qualquer dos ramos que influenciam a repressão deste barramento (4-9, 6-11, 10-11 ou 12-13) não permite em nenhum dos casos obter o valor da potência especificada. Na Tabela 4.9, P_i^R representa a potência permitida para o barramento 9. Esta situação evidencia que o reforço de um único ramo é neste caso insuficiente. Em seguida será mostrado como se poderia atingir o valor da potência especificada. Neste estudo considera-se que o valor de reforço de cada ramo

escolhido é sempre um valor tal que garante que a diminuição da repressão é sempre máxima. Sem perda de generalidade e dado que o objectivo da secção é evidenciar que os reforços nem sempre permitem encontrar a potência especificada de forma imediata, considera-se que o reforço escolhido corresponde sempre ao maior valor dual obtido. Para sermos exactos teríamos de determinar a DR para cada ramo cuja restrição apresenta valor dual no problema.

Paralelamente e para enriquecer o processo pode ainda ser definido o objectivo de diminuição da severidade global de repressão para 0.4 pu (valor actual: 0.7357 pu, Tabela 4.10). Neste caso o objectivo será atingido procurando diminuir a severidade individual de repressão no barramento 9 que é aquele que mais contribui (0.2782 pu) para a severidade global de repressão.

A Figura 4.16 mostra os valores duais para o caso base no barramento 9 (que correspondem aos índices de repressão da Tabela 4.10). Em função dessa informação procedeu-se ao reforço do ramo com o maior valor dual (4-9). Como já referido é interessante verificar a existência de um conjunto de ramos que sendo não adjacentes ao barramento 9, influenciam a sua repressão. Após o reforço de 4-9, a nova informação dual permite concluir que o novo ramo a escolher para reforçar é o ramo 10-11 (Figura 4.17). Surge um novo ramo activo, o ramo 7-9. A nova severidade global de repressão é de 0.7352 pu e a severidade individual de repressão é de 0.2777 pu.

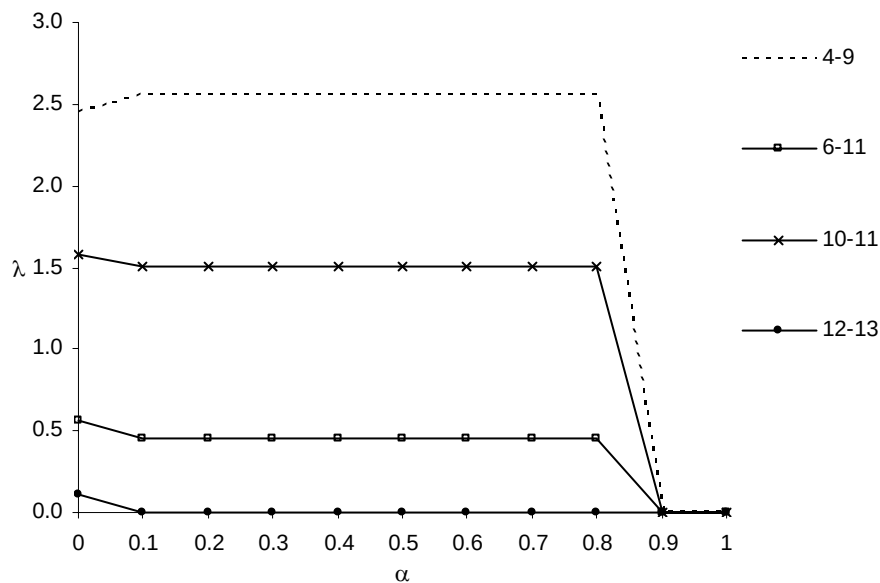


Figura 4.16 – Evolução dos valores duais das restrições de ramos activas ao longo dos cortes de nível α a variar entre [0, 1], barramento 9

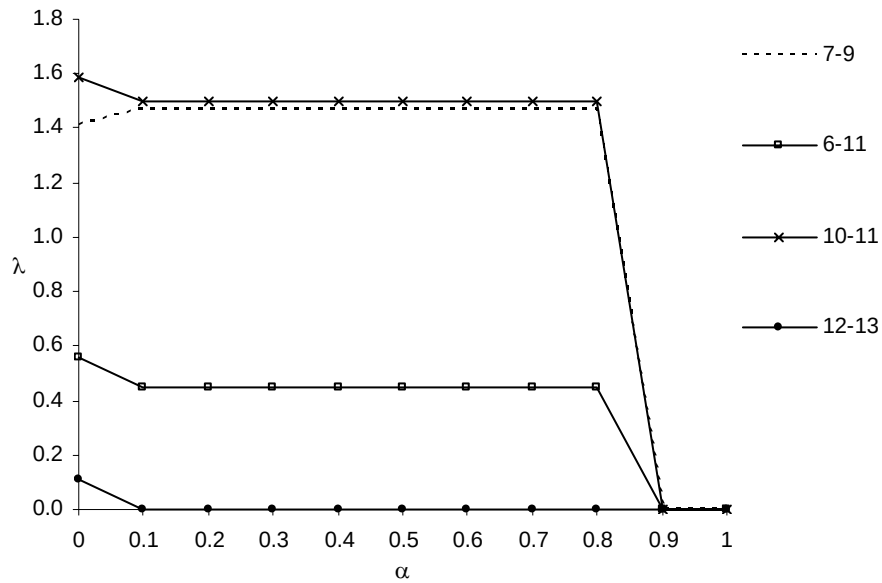


Figura 4.17 – Evolução dos valores duais das restrições na barra 9 entre [0, 1], reforço do ramo 4-9

Com o reforço do ramo 10-11 (Figura 4.18), a severidade global de repressão desce para 0.6994 pu e a severidade individual de repressão para 0.2557 pu. A restrição relativa ao ramo 3-4 apresenta valor dual, embora sem significado (0.0042). Como o valor dual do ramo 6-11 é o mais elevado (1.9454) é este ramo que vai ser reforçado (Figura 4.19).

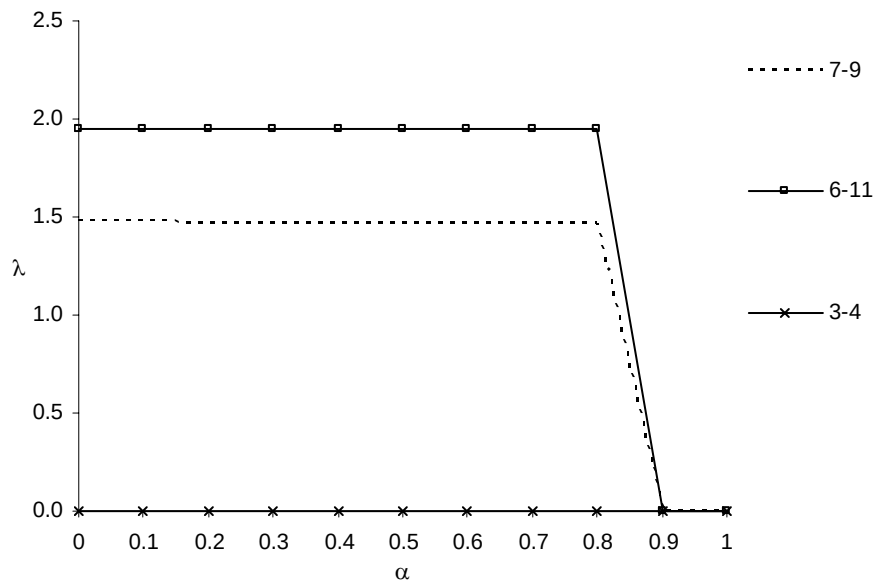


Figura 4.18 – Evolução dos valores duais das restrições na barra 9 entre [0, 1], sobre Figura 4.17 - reforço do ramo 10-11

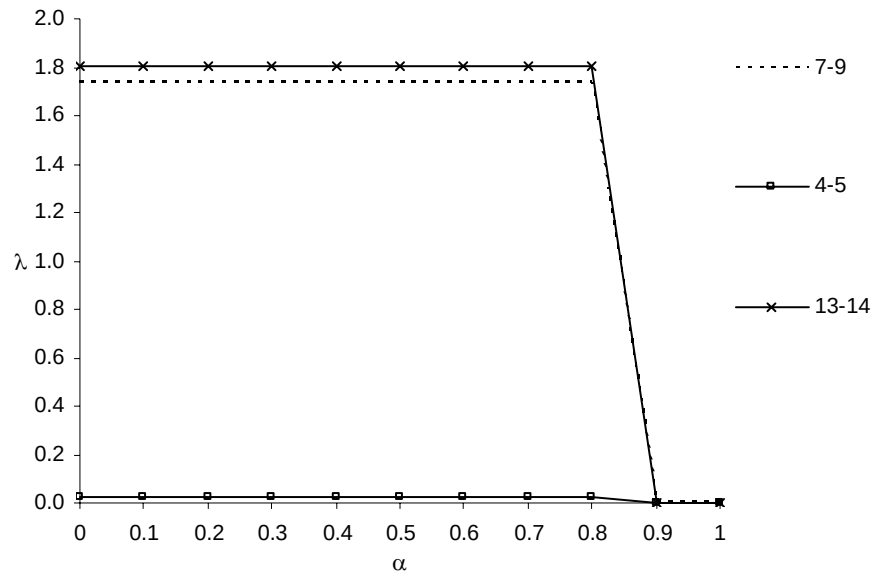


Figura 4.19 – Evolução dos valores duais das restrições na barra 9 entre [0, 1], sobre Figura 4.18 - reforço do ramo 6-11

É possível identificar (Figura 4.19) novas restrições de ramos activas: restrição do ramo 4-5 e do ramo 13-14, ambos ramos não adjacentes ao barramento 9. A severidade global de repressão desce para 0.6656 pu, longe ainda dos 0.4 pu desejados e a severidade individual de repressão é de 0.2313 pu. O ramo com maior valor dual é agora o 13-14. Reforçando este ramo são obtidos os valores duais da Figura 4.20 que correspondem a obter uma severidade global e individual de repressão de respectivamente, 0.5799 pu e 0.1865 pu. O ramo 9-10 surge pela primeira vez com valor dual diferente de zero (1.0379 para $\alpha \in [0; 0.1]$).

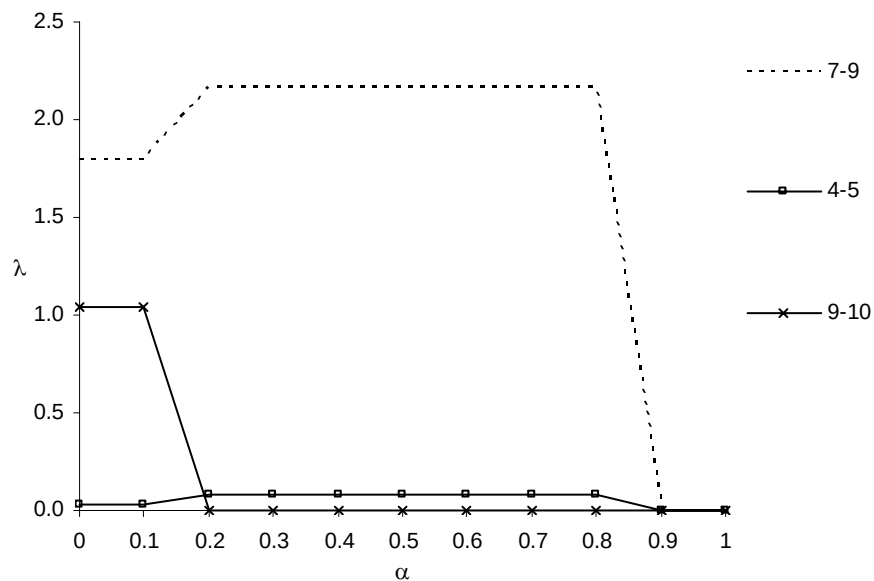


Figura 4.20 – Evolução dos valores duais das restrições na barra 9 entre [0, 1], sobre Figura 4.19 - reforço do ramo 13-14

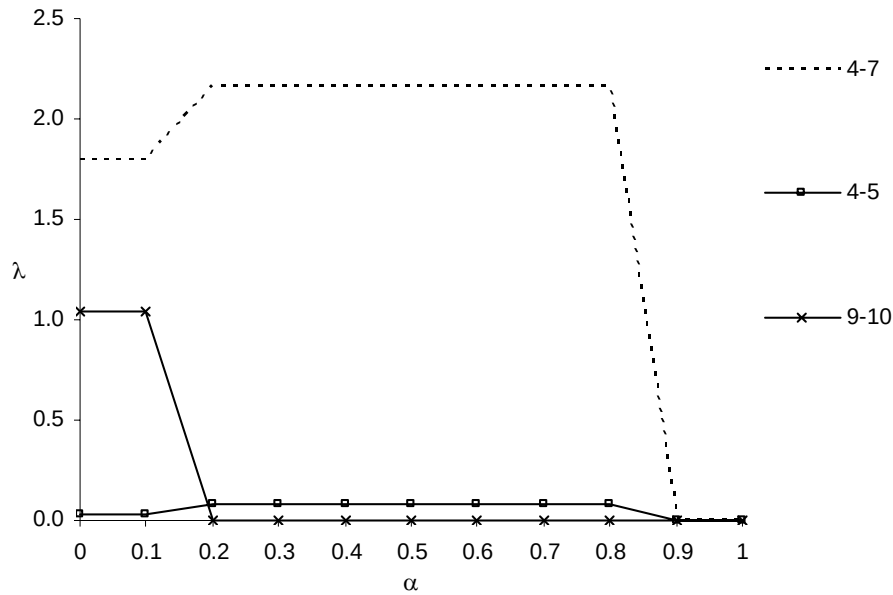


Figura 4.21 – Evolução dos valores duais das restrições na barra 9 entre [0, 1], sobre Figura 4.20 - reforço do ramo 7-9

O reforço do ramo 7-9 cujo valor dual, 7-9 é de 1.7961 no intervalo α [0 e 0.1] e de 2.1666 nos cortes de nível α de 0.2 até 0.9 é escolhido para reforço. O resultado (Figura 4.21) revela uma severidade global de repressão de 0.5797 pu e uma severidade individual de repressão de 0.1865 pu. O grau de repressão não sofre qualquer alteração desde o caso base. Reforçando 4-7, a repressão individual do barramento 9 desaparece, assim como o grau de repressão obtendo-se a potência injectada especificada (P_9^{sp}), como pretendido. A severidade de repressão fica pelos 0.3936 pu, portanto abaixo dos 0.4 pu desejados.

A Figura 4.22 resume os resultados encontrados para a estratégia de diminuição da severidade global de repressão definida (0.4 pu). Como se pode observar durante o processo de redução da repressão no barramento 9, também a repressão dos barramentos 10 e 14 é influenciada (anulada neste caso). Essa influência é pormenorizada nas Figuras 4.23 a 4.25, onde P_i e P_i' têm os significados habituais e $P_i f$ representa a potência injectada difusa após reforço dos ramos no barramento 9.

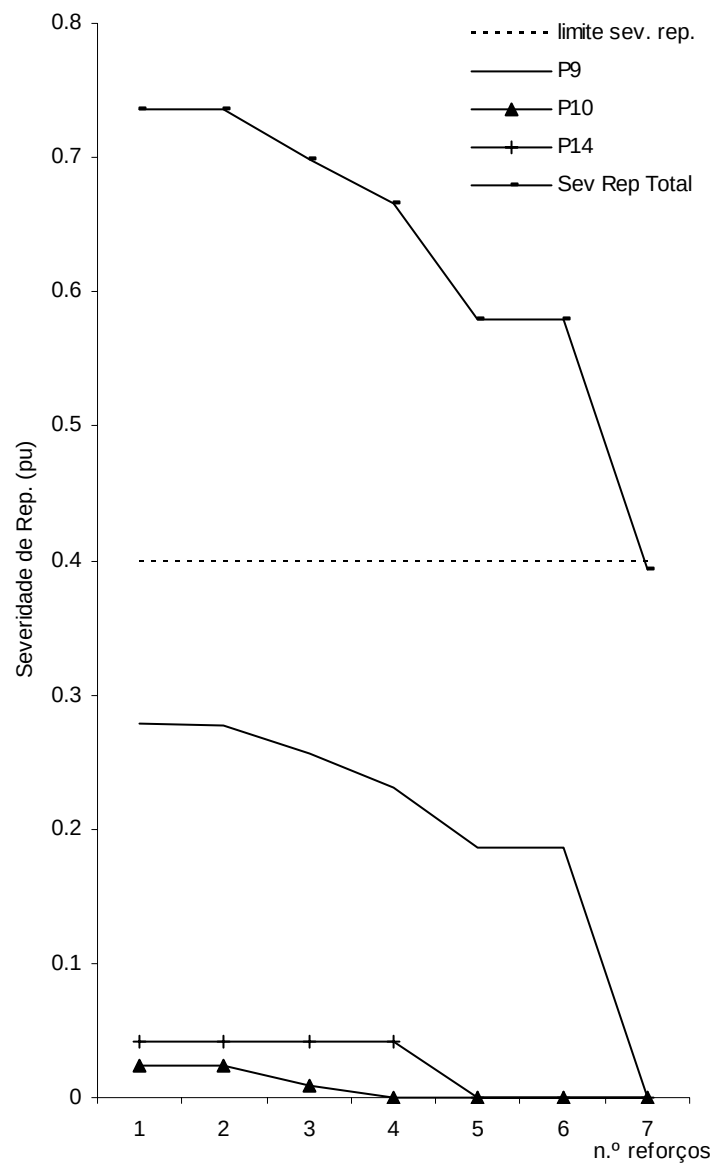


Figura 4.22 – Evolução dos resultados para a severidade de repressão

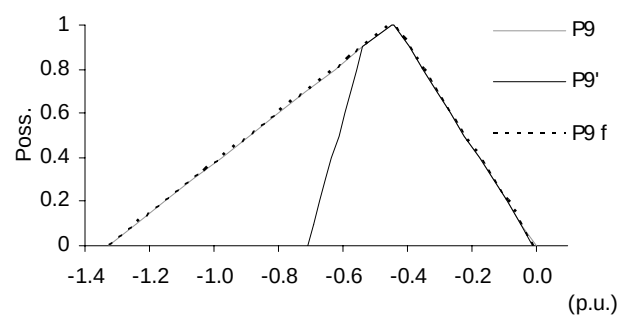


Figura 4.23 – Severidade individual de repressão no barramento 9



Figura 4.24 – Severidade individual de repressão no barramento 10

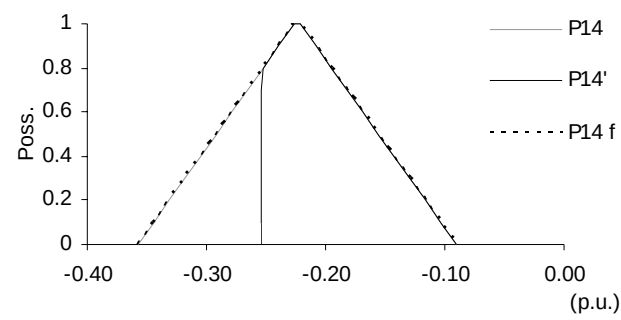


Figura 4.25 – Severidade individual de repressão no barramento 14

4.5 AC CFPP NA MELHORIA DA ADEQUAÇÃO

4.5.1 Resultados para a adequação da rede aplicando o AC CFPP – CASO BASE

De forma a serem obtidos resultados completos foi utilizado o AC CFPP. Tal como anteriormente, começam por se obter os valores de referência para os trânsitos de potência aparente (Tabela 4.13). Em seguida são aplicados os limites nos ramos na mesma proporção que no caso DC e aplica-se o AC CFPP sendo possível a identificação dos congestionamentos nos ramos (Tabela 4.14). A consequência dos congestionamentos sobre a potência activa injectada pode ser visualizada na Tabela 4.15.

Nos resultados seguintes apenas são disponibilizados os valores extremos dos cortes de nível α . Os valores completos (por cada corte de nível α estudado) encontram-se no Anexo B.

Tabela 4.13 – Distribuições de possibilidade para o trânsito de potência aparente (SFPP AC) sem restrição de ramos e valor utilizado para restrição dos ramos nos estudos seguintes ($S_{ik \max}$), pu

S_{ik}	0-	1-	1+	0+	$S_{ik \max}$
1-2	1.6685	1.8613	1.8835	2.0714	1.893
1-5	0.7560	0.9032	0.9149	1.0698	0.923
2-3	0.4872	0.7840	0.7978	1.0863	0.812
2-4	0.4735	0.6669	0.6778	0.8841	0.688
2-5	0.3148	0.5097	0.5192	0.7285	0.53
3-4	0.0000	0.1825	0.1965	0.5923	0.216
4-5	0.2886	0.6717	0.6865	1.0055	0.702
4-7	0.0154	0.4159	0.4255	0.9365	0.451
4-9	0.0181	0.2353	0.2407	0.5337	0.255
5-6	0.2038	0.6246	0.6370	1.2149	0.666
6-11	0.0240	0.1413	0.1468	0.3791	0.158
6-12	0.0151	0.1254	0.1281	0.3225	0.138
6-13	0.0592	0.2973	0.3040	0.6866	0.323
7-8	0.1739	0.2432	0.2479	0.3154	0.251
7-9	0.0916	0.4338	0.4438	0.9414	0.469
9-10	0.0000	0.0776	0.0841	0.3533	0.087
9-14	0.0000	0.1390	0.1453	0.4373	0.16
10-11	0.0000	0.0788	0.0836	0.3121	0.095
12-13	0.0000	0.0290	0.0313	0.1638	0.071
13-14	0.0000	0.0985	0.1039	0.3241	0.115

Foram encontrados sete barramentos com repressão. Os barramentos 1, 3, 9, 10, 12, 13 e 14 sofreram repressões nas potências activas injectadas. O barramento 9 sofre também repressão na potência reactiva injectada. No que se refere à adequação da rede, conforme índices definidos no Capítulo 3, a severidade global de repressão encontrada corresponde a 66.02 MW e 8.88 Mvar, respectivamente para a potência activa injectada e para a potência reactiva

injectada. O grau de repressão é máximo para a potência activa (barramento 3, Figura 4.26b) e de 0.9 para a potência reactiva (barramento 9, Figura 4.28b). Relativamente à repressão de potência activa, o barramento 9 representa cerca de 37% da severidade global de repressão. A severidade global de repressão corresponde a 22% da carga total.

Tabela 4.14 – Trânsito de potência aparente c/ restrição (CFPF) e limites à capacidade de transporte utilizados, pu

S_{ik}'	0-	1-	1+	0+	$S_{ik \max}$
1-2	1.7481	1.8613	1.8835	1.8930	1.8930
1-5	0.8274	0.9032	0.9149	0.9230	0.9230
2-3	0.5091	0.7840	0.7978	0.8120	0.8120
2-4	0.5721	0.6669	0.6778	0.6880	0.6880
2-5	0.4306	0.5097	0.5192	0.5300	0.5300
3-4	0.0000	0.1825	0.1965	0.2160	0.2160
4-5	0.4919	0.6717	0.6865	0.7020	0.7020
4-7	0.1536	0.4159	0.4255	0.4510	0.4510
4-9	0.0834	0.2353	0.2407	0.2550	0.2550
5-6	0.4077	0.6246	0.6370	0.6660	0.6660
6-11	0.0385	0.1413	0.1468	0.1580	0.1580
6-12	0.0227	0.1254	0.1282	0.1380	0.1380
6-13	0.0765	0.2973	0.3040	0.3230	0.3230
7-8	0.1739	0.2432	0.2479	0.2510	0.2510
7-9	0.1644	0.4338	0.4438	0.4690	0.4690
9-10	0.0000	0.0776	0.0841	0.0870	0.0870
9-14	0.0000	0.1390	0.1453	0.1600	0.1600
10-11	0.0000	0.0788	0.0836	0.0950	0.0950
12-13	0.0000	0.0290	0.0313	0.0710	0.0710
13-14	0.0000	0.0985	0.1039	0.1150	0.1150

Tabela 4.15 - Distribuições de possibilidade para a potência activa injectada, modelo CFPF AC com restrição de ramos (pu)

P_i'	0-	1-	1+	0+
1	2.6218	2.7460	2.7736	2.7949
2	0.0328	0.1788	0.1872	0.3332
3	-0.9950	-0.9514	-0.9326	-0.3768
4	-0.7648	-0.4828	-0.4732	-0.1912
5	-0.1216	-0.0768	-0.0752	-0.0304
6	-0.1792	-0.1131	-0.1109	-0.0448
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	-0.7511	-0.4469	-0.4381	0.0000
10	-0.1783	-0.1364	-0.1337	-0.0540
11	-0.0840	-0.0530	-0.0520	-0.0210
12	-0.2026	-0.0924	-0.0906	0.0000
13	-0.4324	-0.2045	-0.2005	0.0000
14	-0.2669	-0.2257	-0.2213	-0.0894

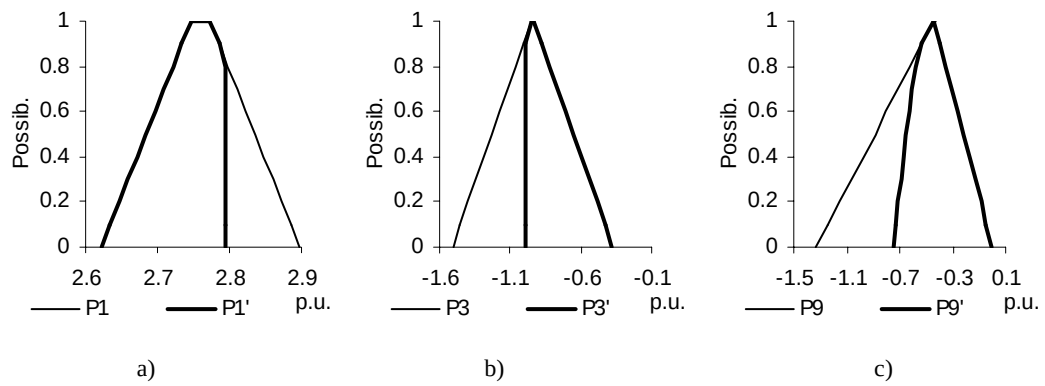


Figura 4.26 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada nos barramentos 1 (a), 3 (b) e 9 (c)

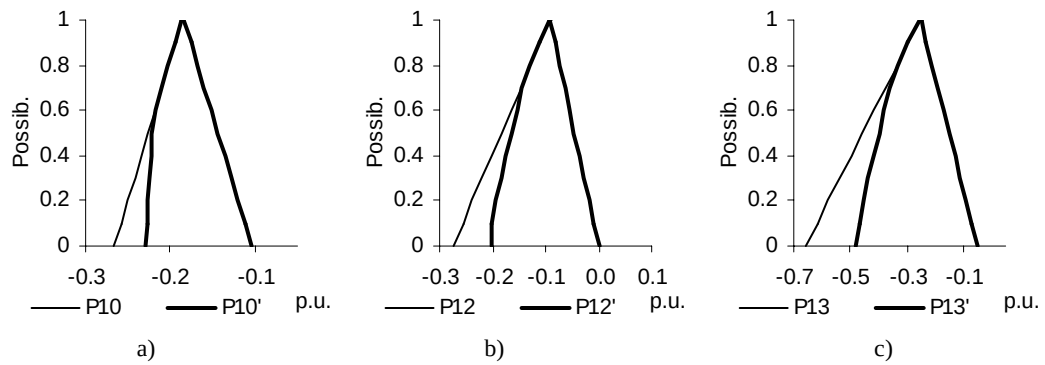


Figura 4.27 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada nos barramentos 10 (a), 12 (b) e 13 (c)

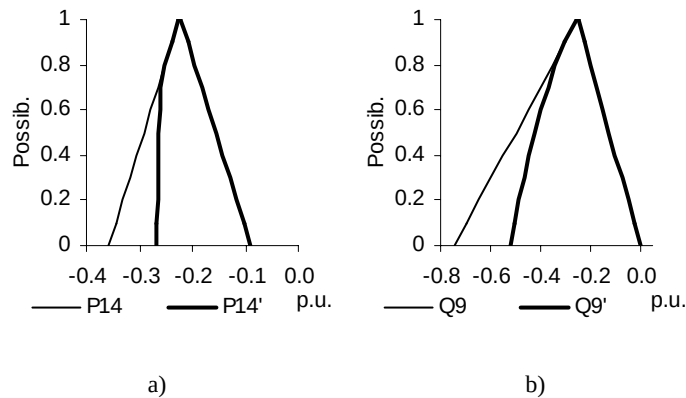


Figura 4.28 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada no barramento 14 (a) e para a potência reactiva injectada no barramento 9 (b)

A Tabela 4.16 tem o significado da Tabela 4.1 e mostra a informação dual obtida para o caso base no corte de nível $\alpha=0$.

Tabela 4.16 – Valores duais obtidos para a regressão base AC CFPF e para os cortes α extremos (0- e 0+)

Ramo\ Nó	barra 1	barra 3	barra 9	barra 10	barra 12	barra 13	barra 14
1-2	0.9833						
1-5	0.9862						
2-3	0.0027	0.8942					
3-4		0.9909	0.0097				
4-7			0.6989				
4-9			1.4046				
6-11			0.4141				
6-12					1.0619		
6-13						1.2080	
9-10				1.0117	0.0070	0.6881	
9-14							0.9620
10-11			1.4666	1.0194			
12-13					0.8532	0.9148	
13-14							0.9621
α	0+	0-	0-	0-	0-	0-	0-

4.5.2 Evolução dos valores duais

Na metodologia DC é possível o estabelecimento de patamares, ao contrário da metodologia AC onde o reforço marginal assume sempre valores diferentes para cada valor de $S_{ik \text{ máx}}$. A Figura 4.29 ilustra novamente o barramento 9 como exemplo, desta vez para o modelo completo, no que se refere à evolução do valor dual e da potência activa injectada em função do reforço do ramo 6-11.

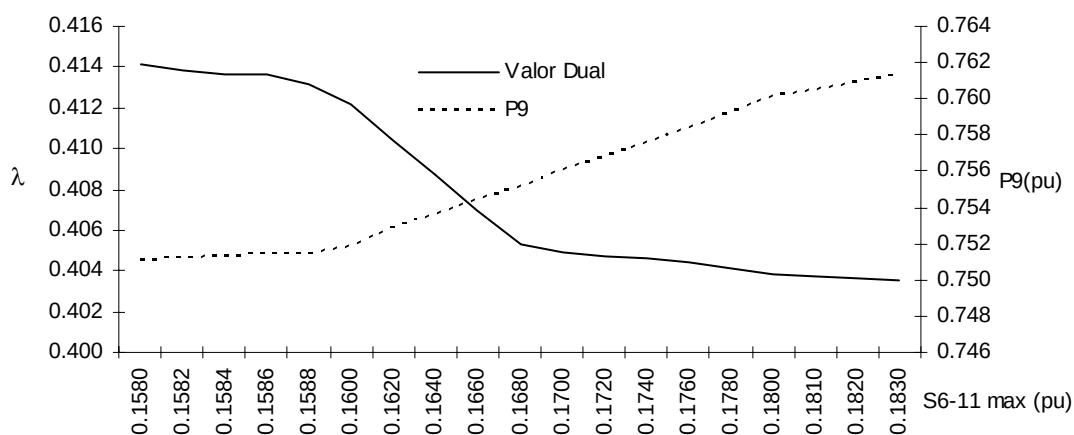


Figura 4.29 – Evolução dos valores duais e diminuição da repressão no barramento 9 em função do reforço do ramo 6-11

O valor limite de 6-11 é de 0.1580 pu (caso base). Como se pode observar ao se aumentar o limite do ramo vai existir uma variação do valor dual por cada valor de reforço. A partir de 0.1830 pu o valor dual é anulado. Os valores foram obtidos por recurso a simulação.

4.5.3 Validação da metodologia incremental

O processo incremental foi apresentado na secção 4.2. As nomenclaturas utilizadas a seguir, referem-se a essa secção. A finalidade desta secção é fornecer alguns exemplos que permitam verificar se, conforme Figura 4.3 o valor de S_{ik}^R está próximo de $S_{ik \text{ real}}$ e se as aproximações calculadas por (4.11) produzem erros consideráveis.

Com a finalidade de verificar o primeiro objectivo, o problema de optimização não linear foi resolvido nas condições do caso base, procedendo-se ao reforço individual num valor elevado (valor de referência) de todos os ramos identificados na Tabela 4.16. Com este procedimento obteve-se, para cada reforço, o valor de P_i^{per} (Figura 4.3). Em seguida, para o valor dual inicial (Tabela 4.16) que corresponde ao limite do ramo $S_{ik \text{ max}}$ (Tabela 4.14) e resolvendo (4.10) em ordem a S_{ik}^R (onde $P_i^R = P_i^{\text{per}}$) obtém-se o valor para o qual se deve reforçar o ramo em estudo. Este valor será à partida aproximado e terá como correspondência P_i^{prox} (Figura 4.3). P_i^b corresponde ao valor da potência activa injectada obtido nas condições do caso base. Os resultados estão disponíveis na Tabela 4.17.

Pode verificar-se que na maior parte dos casos o reforço conseguido a partir de (4.10) fornece bons resultados ($P_i^{\text{per}} = P_i^{\text{prox}}$). Nos casos em que $P_i^{\text{per}} \neq P_i^{\text{prox}}$ (ramos: 3-4, 10-11, 6-12 e 6-13), a diferença não é assinalável.

No caso do ramo 4-7 (barramento 9), a elevada percentagem $P_i^{\text{per}} - P_i^{\text{prox}}$ é desprezável (0.0003 pu).

Em seguida (Figuras 4.30 a 4.34) e tendo por base o processo enunciado na secção 4.2 (Figura 4.4) procura verificar-se o segundo objectivo da secção que consiste em comparar os resultados obtidos por aproximação ($E P_i$) com resultados exactos (calculados por simulação), $C P_i$. Parte-se do valor aproximado obtido anteriormente, S_{ik}^R e efectua-se uma linearização até $S_{ik \text{ max}}$ (Figura 4.4, recta a tracejado). Depois calculam-se valores aproximados de P_i ($E P_i$) por soma de (4.11) com P_i^b .

Tabela 4.17 –Reforço baseado no processo incremental

Nó	Reforço	P_i (pu)				Diminuição Repressão (%)		Incremento ramo (%)
		P_i^b	P_i^{prox}	P_i^{per}	$P_i^{per} - P_i^{prox}$	P_i^{prox}	$P_i^{per} - P_i^{prox}$	
1	R 1-2	2.7949	2.8978	2.8978	0.0000	100	0	0
1	R 1-5	2.7949	2.8015	2.8015	0.0000	100	0	0
1	R 2-3	2.7949	2.7949	2.7949	0.0000	100	0	0
3	R 2-3	-0.9952	-1.0126	-1.0126	0.0000	100	0	0
3	R 3-4	-0.9952	-1.1169	-1.1184	0.0016	99	1	1
9	R 3-4	-0.7511	-0.7513	-0.7513	0.0000	100	0	0
9	R 4-7	-0.7511	-0.7516	-0.7518	0.0003	63	37	0
9	R 4-9	-0.7511	-0.7515	-0.7515	0.0000	100	0	0
9	R 6-11	-0.7511	-0.7613	-0.7613	0.0000	100	0	0
9	R 10-11	-0.7511	-0.7987	-0.8014	0.0027	95	5	7
10	R 9-10	-0.1783	-0.2160	-0.2160	0.0000	100	0	0
10	R 10-11	-0.1783	-0.2139	-0.2145	0.0006	98	2	0
12	R 6-12	-0.2026	-0.2727	-0.2745	0.0018	98	2	1
12	R 9-10	-0.2026	-0.2026	-0.2026	0.0000	100	0	0
12	R 12-13	-0.2026	-0.2117	-0.2123	0.0006	94	6	0
13	R 6-13	-0.4324	-0.5329	-0.5357	0.0028	97	3	2
13	R 9-10	-0.4324	-0.4476	-0.4484	0.0008	95	5	12
13	R 12-13	-0.4324	-0.4424	-0.4424	0.0000	100	0	0
14	R 9-14	-0.2669	-0.3576	-0.3576	0.0000	100	0	0
14	R 13-14	-0.2669	-0.3553	-0.3553	0.0000	100	0	0

Onde:

“Incremento ramo” – representa o incremento que terá de se fazer a mais no ramo para se obter o valor máximo de diminuição de repressão (P_i^{per}) comparativamente a (P_i^{prox})

Nas Figuras 4.30 a 4.32, o valor da potência activa injectada refere-se à diminuição do valor em termos de intervalo e para o corte $\alpha=0$.

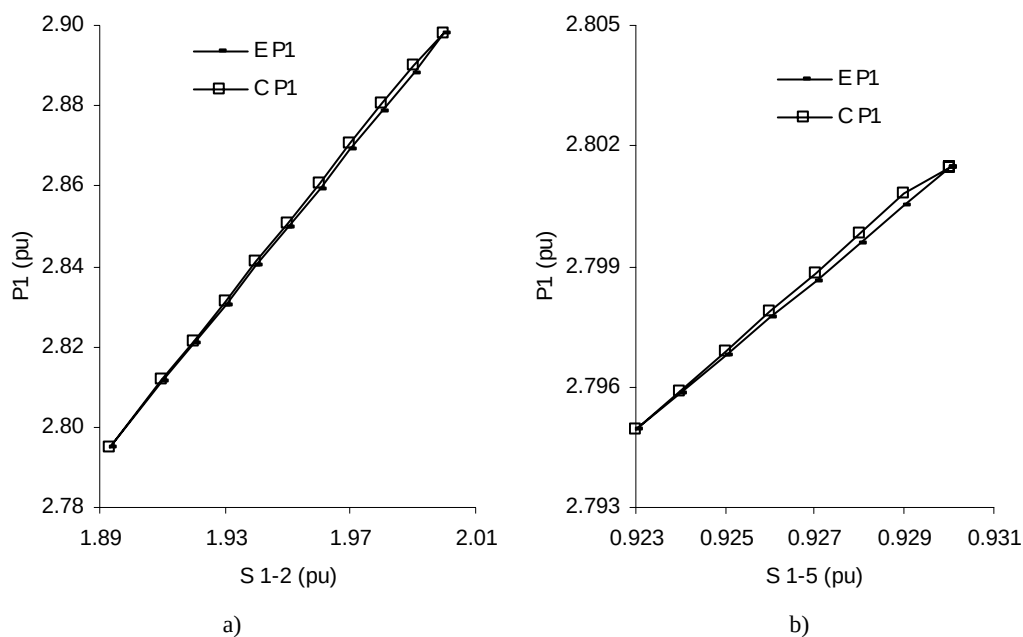


Figura 4.30 - Evolução da diminuição da repressão do barramento 1 em função do reforço individual dos ramos 1-2 (a) e 1-5 (b), pu

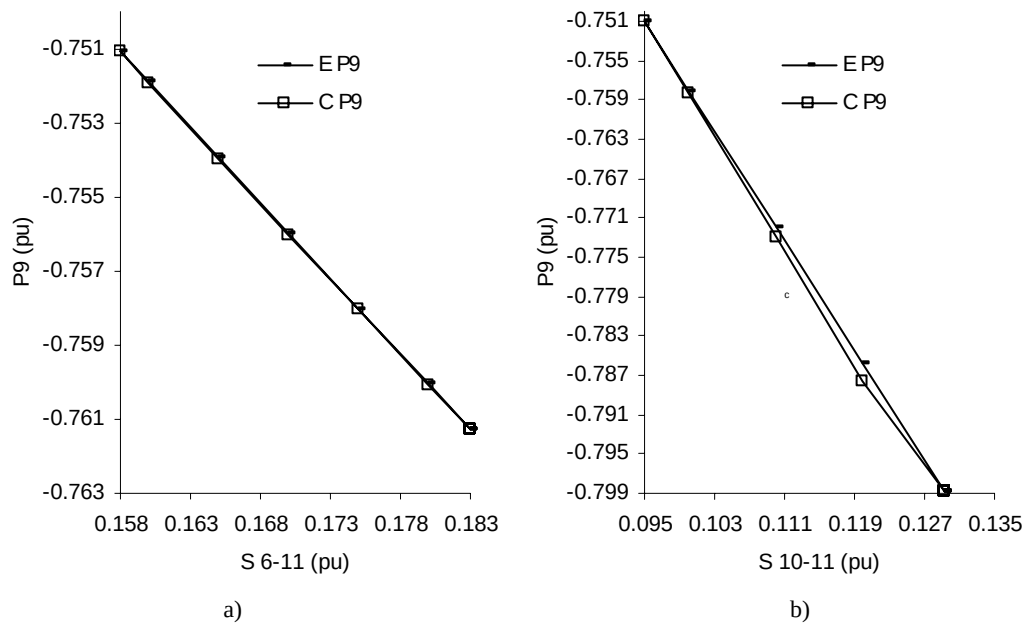


Figura 4.31 - Evolução da diminuição da repressão do barramento 9 em função do reforço individual dos ramos 6-11 (a) e 10-11 (b), pu

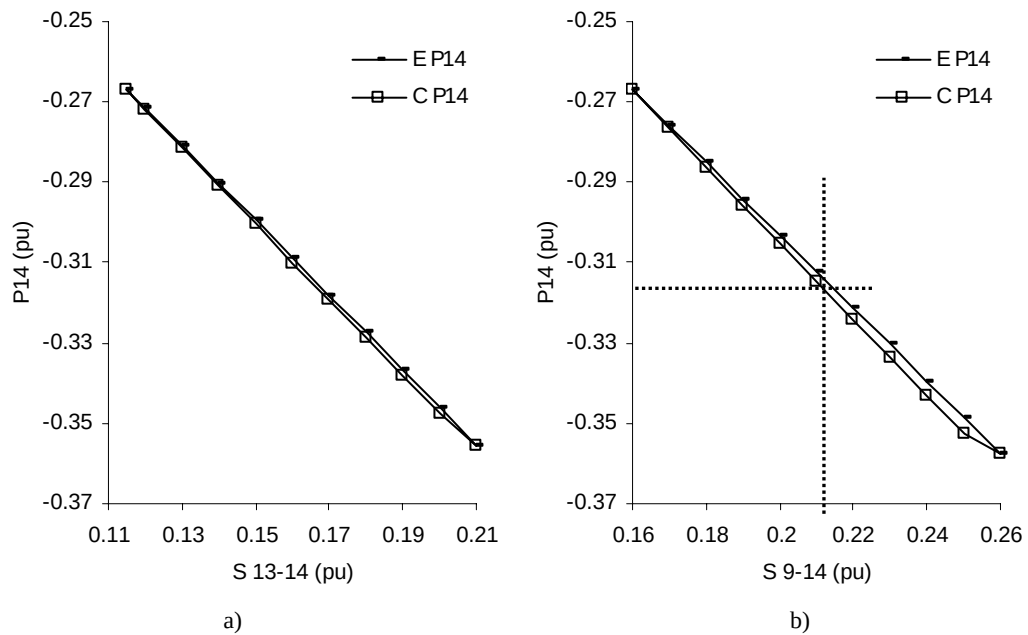


Figura 4.32 - Evolução da diminuição da repressão do barramento 14 em função do reforço individual dos ramos 13-14 (a) e 9-14 (b), pu

Não são mostrados todos os barramentos. De qualquer forma, as diferenças encontradas para os barramentos apresentados e restantes entre a potência aproximada ($E P_i$) e simulada ($C P_i$) não têm significado. Ou seja a utilização de (4.11) induz um pequeno erro que se considera desprezável e permite ter uma noção do impacto do reforço do ramo na potência injectada no modelo AC (que não dispõe de patamares como no DC, dada a variação de λ no AC até para

pequenos reforços). Por exemplo, colocando o ramo 9-14 (Figura 4.32 b) com um valor limite de 0.215 pu pode-se obter uma potência injectada esperada no barramento 14 de cerca de 0.317 pu.

Com a mesma finalidade foi também testada a rede de 118 barramentos nas condições do Capítulo 3. Em seguida são ilustrados os resultados obtidos para o barramento 31, escolhido ao acaso, da rede referida (Tabela 4.18 e Figuras 4.33 e 4.34). Como se pode verificar, quer no primeiro objectivo, quer no segundo as diferenças não são assinaláveis. E P_{31} e $C P_{31}$ apresentam diferenças que se podem considerar desprezáveis quando se reforça 17-31, 28-29 ou 31-32 (ramos que influenciam a repressão do barramento 31 – caso base).

Tabela 4.18 – Comparação entre os valores obtidos por reforço sistemático de ramos e reforço baseado no processo incremental para o barramento 31 da rede de 118 barramentos do IEEE ($\alpha=0$)

Nó	Reforço	λ	Pi (pu)			
			P_i^b	P_i^{prox}	P_i^{per}	$P_i^{per} - P_i^{prox}$
31	R 17-31	1.2999	-0.4956	-0.5549	-0.5582	0.0033
31	R 28-29	0.9669	-0.4956	-0.4996	-0.50017	0.0006
31	R 31-32	0.9506	-0.4956	-0.5769	-0.5785	0.0016

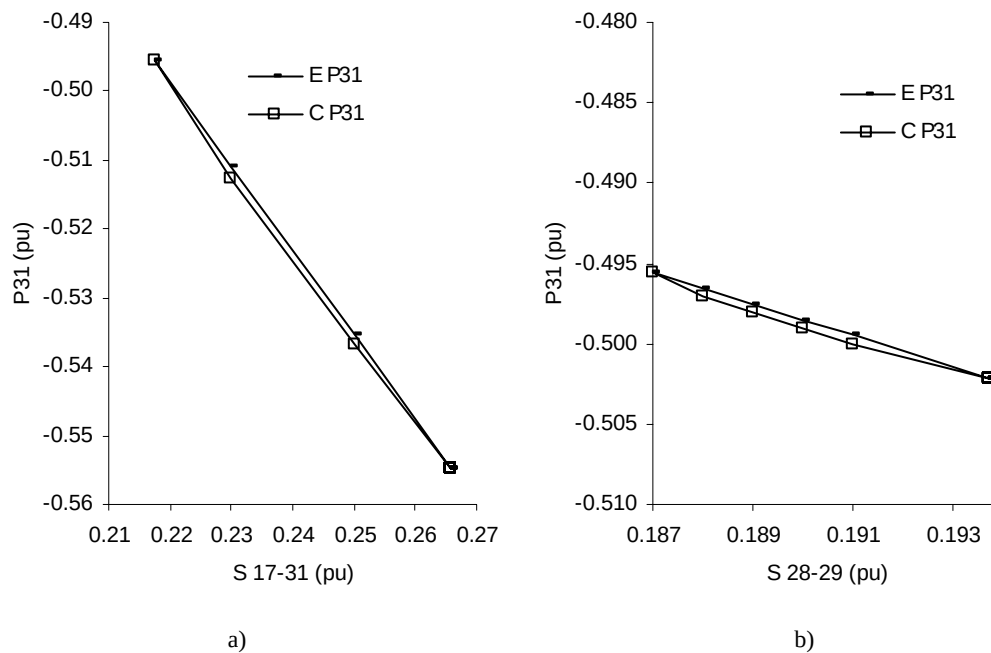


Figura 4.33 - Evolução da diminuição da repressão do barramento 31 em função do reforço individual dos ramos 17-31 (a) e 28-29 (b), pu

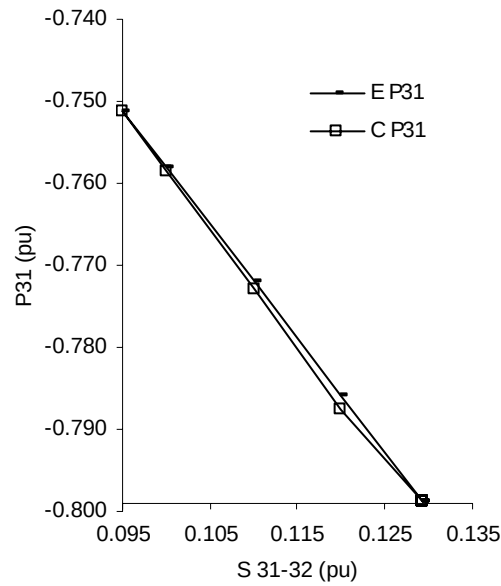


Figura 4.34 - Evolução da diminuição da repressão do barramento 31 em função do reforço individual do ramo 31-32

Em resumo, (4.10) resolvido em ordem a S_{ik}^R oferece a obtenção do valor aproximado para reforço do ramo e (4.11) permite, dentro do intervalo desse reforço, estabelecer o ganho parcial da diminuição da repressão.

Como se referiu na secção 4.2 poderiam ser calculados valores intermédios para P_i (Figura 4.5) de forma a obter resultados com maior precisão. Contudo, o cálculo realizado para o maior incremento dos ramos (S_{ik}^R) demonstrou bons resultados ao longo da recta inicial (Figura 4.4), pelo que não se optou por testar (4.11) para valores intermédios.

4.5.4 Estudo de Caso

4.5.4.1 Identificação de opções para reforço da rede e sua simulação

Com a mesma finalidade da secção 4.4.3 executa-se em seguida o modelo completo. Neste caso e na falta de patamares existentes apenas no modelo DC, o valor dos reforços será calculado a partir do processo incremental sendo considerado o corte de nível $\alpha=0$. Como anteriormente, a estratégia a observar consiste na diminuição da severidade global de repressão. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 4.19.

Os objectivos, que se mantêm os mesmos do modelo DC são:

- a) conhecer completamente as potencialidades de cada reforço;
- b) o estudo de todas as AR identificadas pelo processo incremental. “AR” identifica as acções de reforço mais promissoras em cada barramento.

No caso a), dada a natureza do processo incremental, a obtenção de S_{ik}^R (Figura 4.3) permite que se cumpra com o primeiro objectivo. De facto, S_{ik}^R corresponde ao valor de reforço aproximado, função da maior diminuição da repressão possível (P_i^{per}). De realçar que no modelo completo, a alínea a) é um dos passos intermédios do processo incremental.

No caso b) o estudo de todas as AR em sistemas de maior dimensão levará à execução de um elevado conjunto de problemas de optimização com tempos de simulação que poderão ser consideráveis, dado o grande número de variáveis envolvidas e a natureza não linear do problema. O procedimento normal não é este, mas como anteriormente (no modelo DC) o estudo da AR que apresenta maior DR. Contudo, importa realçar que no caso do modelo completo o uso do processo incremental leva sempre à realização de uma optimização adicional. Por este motivo é importante perceber se o modelo DC oferece indicações consistentes de reforço.

Como a preocupação é com a severidade de repressão foi escolhido para cada barramento o corte que é normalmente responsável pelo maior valor deste índice ($\alpha=0$). Na Tabela 4.19 estão salientadas as maiores diminuições de repressão para cada barramento, calculadas de acordo com o processo incremental.

Para os valores de reforço aproximados calculados (Tabela 4.19) pelo processo incremental, apresentam-se em seguida os resultados para os índices de adequação da rede (Tabela 4.21 e Tabela 4.22). Os valores salientados mostram as alterações verificadas em termos de severidade de repressão individual (no barramento) e de grau de repressão relativamente ao caso base, que por clareza de exposição está detalhado na Tabela 4.20.

Tabela 4.19 - Valores de λ para a repressão base, diminuição de repressão conseguida ($\alpha=0$) e aumento do limite da capacidade de transporte quando se relaxa apenas o ramo em estudo (pu).

Nó	Reforço	λ	P_i ($\alpha=0$)			ΔS_{ik}		Diferença
			P_i^b	P_i^R	DR $^*_{-1}$	$S_{ik\ max}$	S_{ik}^R	
1	R 1-2 AR1	0.9833	2.7949	2.8978	0.1029	1.8930	2.0000	0.1070
1	R 1-5	0.9862	2.7949	2.8015	0.0065	0.9230	0.9300	0.0070
1	R 2-3	0.0027	2.7949	2.7949	0.0000	0.8120	0.8120	0.0000
3	R 2-3	0.8942	-0.9952	-1.0126	0.0174	0.8120	0.8320	0.0200
3	R 3-4 AR2	0.9909	-0.9952	-1.1169	0.1216	0.2160	0.3400	0.1240
9	R 3-4	0.0097	-0.7511	-0.7513	0.0002	0.2160	0.2160	0.0000
9	R 4-7	0.6989	-0.7511	-0.7516	0.0005	0.4510	0.4520	0.0010
9	R 4-9	1.4046	-0.7511	-0.7515	0.0004	0.2550	0.2553	0.0003
9	R 6-11	0.4141	-0.7511	-0.7613	0.0102	0.1580	0.1830	0.0250
9	R 10-11 AR3	1.4666	-0.7511	-0.7987	0.0476	0.0950	0.1300	0.0350
10	R 9-10 AR4	1.0117	-0.1783	-0.2160	0.0377	0.0870	0.1250	0.0380
10	R 10-11	1.0194	-0.1783	-0.2139	0.0356	0.0950	0.1300	0.0350
12	R 6-12 AR5	1.0619	-0.2026	-0.2727	0.0702	0.1380	0.2100	0.0720
12	R 9-10	0.0070	-0.2026	-0.2028	0.0002	0.0870	0.1200	0.0330
12	R 12-13	0.8532	-0.2026	-0.2117	0.0091	0.0710	0.0830	0.0120
13	R 6-13 AR6	1.2080	-0.4324	-0.5329	0.1005	0.3230	0.4100	0.0870
13	R 9-10	0.6891	-0.4324	-0.4476	0.0152	0.0870	0.1102	0.0232
13	R 12-13	0.9148	-0.4324	-0.4424	0.0100	0.0710	0.0820	0.0110
14	R 9-14 AR7	0.9620	-0.2669	-0.3576	0.0907	0.1600	0.2600	0.1000
14	R 13-14	0.9621	-0.2669	-0.3553	0.0885	0.0950	0.2100	0.1150

Tabela 4.20 – Valores obtidos para a severidade individual e global de repressão (pu) e para o grau de repressão, caso base

Nó	Sev. Rep	Grau Rep.
P1	0.0418	0.9
P2	0.0000	0.0
P3	0.2394	1.0
P4	0.0000	0.0
P5	0.0000	0.0
P6	0.0000	0.0
P7	0.0000	0.0
P8	0.0000	0.0
P9	0.2469	0.9
P10	0.0107	0.6
P11	0.0000	0.0
P12	0.0236	0.8
P13	0.0644	0.8
P14	0.0334	0.8
Sev. Total	0.6602	pu

Como se constata nas Tabelas 4.21 e 4.22 (considerando apenas uma oportunidade de reforço e a agregação da DR por ramo), a melhor opção consiste na escolha do ramo 3-4. Esta foi também a opção seleccionada no caso DC. A severidade de repressão global diminui de 0.1178 pu e o grau de repressão desce de 1.0 para 0.9. Se a estratégia consistisse na

diminuição do grau de repressão, o utilizador deveria actuar sobre os valores duais dos ramos responsáveis pela repressão nos cortes α superiores.

Tabela 4.21 – Valores obtidos para a severidade individual e global de repressão (pu) e para o grau de repressão, acções de reforço 1 a 4

Nó	Acção Reforço 1 Reforço de 1-2		Acção Reforço 2 Reforço de 3-4		Acção Reforço 3 Reforço de 10-11		Acção Reforço 4 Reforço de 9-10	
	Sev. Rep	Grau Rep.	Sev. Rep	Grau Rep.	Sev. Rep	Grau Rep.	Sev. Rep	Grau Rep.
P1	0.0000	0.0	0.0418	0.9	0.0418	0.9	0.0418	0.9
P2	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P3	0.2394	1.0	0.1737	0.9	0.2394	1.0	0.2394	1.0
P4	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P5	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P6	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P7	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P8	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P9	0.2469	0.9	0.2469	0.9	0.2218	0.9	0.2469	0.9
P10	0.0107	0.6	0.0107	0.6	0.0001	0.1	0.0000	0.0
P11	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P12	0.0236	0.8	0.0236	0.8	0.0236	0.8	0.0228	0.8
P13	0.0644	0.8	0.0644	0.8	0.0644	0.8	0.0562	0.8
P14	0.0334	0.8	0.0334	0.8	0.0334	0.8	0.0334	0.8
Sev. Total	0.6184	pu	0.5941	pu	0.6246	pu	0.6406	pu

Tabela 4.22 – Valores obtidos para a severidade individual e global de repressão (pu) e para o grau de repressão, acções de reforço 5 a 7

Nó	Acção Reforço 5 Reforço de 6-12		Acção Reforço 6 Reforço de 6-13		Acção Reforço 7 Reforço de 9-14	
	Sev. Rep	Grau Rep.	Sev. Rep	Grau Rep.	Sev. Rep	Grau Rep.
P1	0.0418	0.9	0.0418	0.9	0.0418	0.9
P2	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P3	0.2394	1.0	0.2394	1.0	0.2394	1.0
P4	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P5	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P6	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P7	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P8	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P9	0.2469	0.9	0.2469	0.9	0.2469	0.9
P10	0.0107	0.6	0.0107	0.6	0.0107	0.6
P11	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
P12	0.0001	0.1	0.0236	0.8	0.0236	0.8
P13	0.0644	0.8	0.0108	0.4	0.0644	0.8
P14	0.0334	0.8	0.0334	0.8	0.0000	0.0
Sev. Total	0.6368	pu	0.6067	pu	0.6268	pu

O processo incremental permitiu a obtenção dos resultados anteriores que correspondem à máxima diminuição possível da repressão. De referir que a partir deste ponto poderiam ser definidos níveis de incremento no limite dos ramos (4.11) para as AR escolhidas (10%, 50%, etc), sendo obtidos novos valores de potências injectadas, $E P_i$ (Figuras 4.4 e 4.5).

Como se pode verificar, a escolha do maior valor dual conduz geralmente à maior diminuição da repressão no barramento, pelo que se pode dizer que na falta de patamares disponíveis como no modelo DC, a informação da Tabela 4.16 dará indicações imediatas interessantes para a escolha dos ramos sem necessidade de testar todos os ramos cuja restrição está activa. No caso em que os valores duais são muito próximos (no mesmo barramento) é conveniente verificar todos os casos (por exemplo: ramos 1-2 e 1-5 no barramento 1).

Finalmente, utiliza-se ainda este estudo de caso para mostrar que a aplicação do CFPPF permite a identificação do efeito dos reforços na repressão de barramentos adjacentes e não adjacentes. Para o segundo caso pode ver-se na Tabela 4.21 que a repressão do barramento 9 é influenciada pelo reforço do ramo 10-11. Também na mesma tabela, a repressão dos barramentos 12 e 13 é influenciada pelo ramo 9-10 (ramo não adjacente). Para percebermos o motivo desta situação, por exemplo para o barramento 13, basta consultarmos a Figura 4.35 referente ao andamento dos valores duais para este barramento nas condições do caso base.

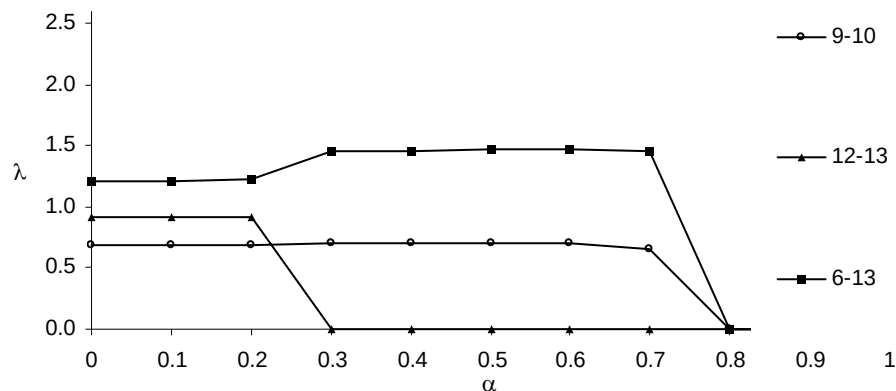


Figura 4.35 –Evolução dos valores duais das restrições de ramos activas ao longo dos cortes α a variar entre 0 e 1 para o caso base, barramento 13

4.5.4.2 Potência permitida e potência especificada

Também no caso do modelo completo será analisada a relação entre a potência especificada e a potência permitida. Com vista à se poderem elaborar mais tarde comparações relativamente ao modelo DC é novamente utilizado o barramento 9. Este barramento apresenta uma potência activa de carga especificada de -1.3275 pu ($\alpha=0$). Como se pode constatar da análise da Tabela 4.19 em nenhuma das situações de reforço testadas (3-4, 4-7, 4-9, 6-11 ou 10-11) se obteve a potência especificada (P_9^{SP}). O reforço singular de um barramento apenas permite a

obtenção de uma potência permitida (P_i^{per}), que no caso da Tabela 4.19 corresponde a P_i^R . Esta situação evidencia que o reforço de um único ramo é neste caso insuficiente.

Em seguida e seguindo o mesmo processo utilizado no modelo DC (secção 4.4.3.2) será mostrado como se pode actuar no sentido de obter a potência desejada. Também neste caso será definido como objectivo complementar a diminuição severidade global de repressão para valores até 0.4 pu. A estratégia escolhida consiste assim em diminuir a severidade global de repressão por actuação (eliminação) sobre a severidade individual de repressão do barramento que mais contribui (0.2469 pu) para a severidade global de repressão.

A Figura 4.36 mostra os valores duais para o caso base no barramento 9 (que correspondem aos índices de repressão da Tabela 4.20).

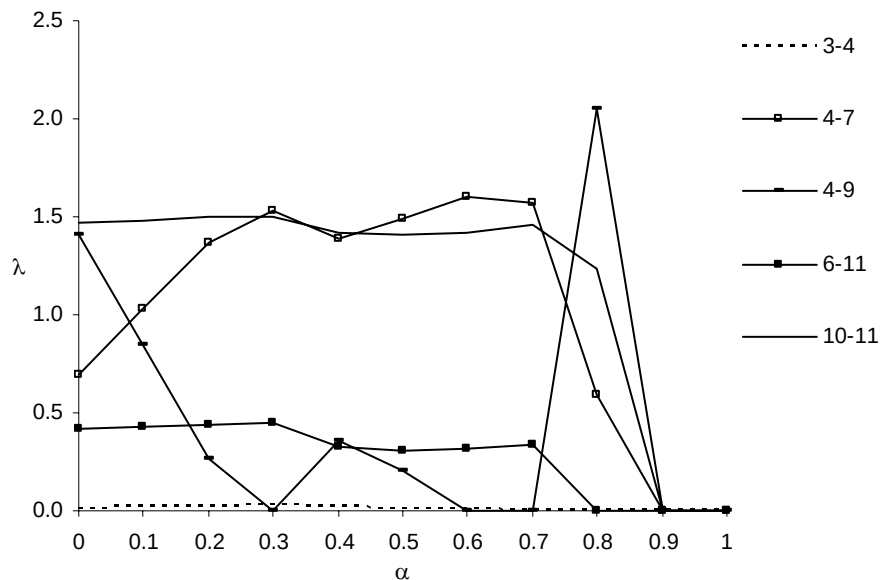


Figura 4.36 – Evolução dos valores duais das restrições de ramos activos ao longo dos cortes de nível α a variar entre [0, 1], barramento 9

Como se pode observar (Figura 4.36), os valores duais apresentam bastantes variações ao longo cortes de nível α , consequência da não linearidade característica do modelo. Se o objectivo para este barramento fosse a diminuição do grau de repressão deveria ser reforçado o ramo 4-9 já que é este que apresenta maior valor dual nos cortes α superiores. Como a finalidade é a redução da severidade de repressão entendeu-se reforçar o ramo 10-11 por apresentar maior valor dual (1.4666) para a base da distribuição de possibilidade.

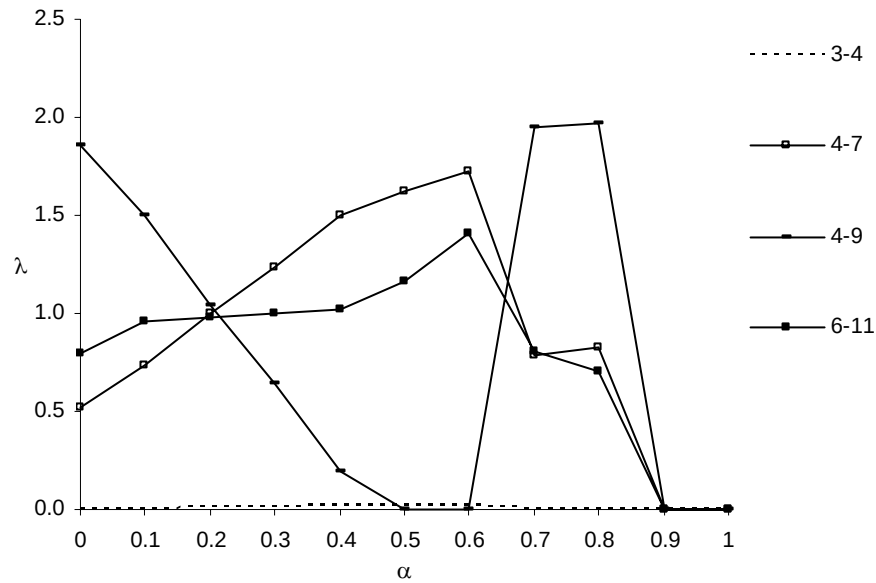


Figura 4.37 – Evolução dos valores duais das restrições na barra 9 entre [0, 1], reforço do ramo 10-11

A nova severidade global de repressão para a Figura 4.37 é de 0.6244 pu e a severidade individual de repressão é de 0.2217 pu. É sugerido o reforço de 4-9 que apresenta na base da distribuição de possibilidade da barra 9 um valor dual de (1.8524 pu). Com este procedimento (Figura 4.46) a repressão global desce para 0.6238 pu e a severidade individual para 0.2211 pu. Como nova restrição activa (Figura 4.38) surge o ramo 13-14 com um valor dual (corte $\alpha=0$) de 0.9604.

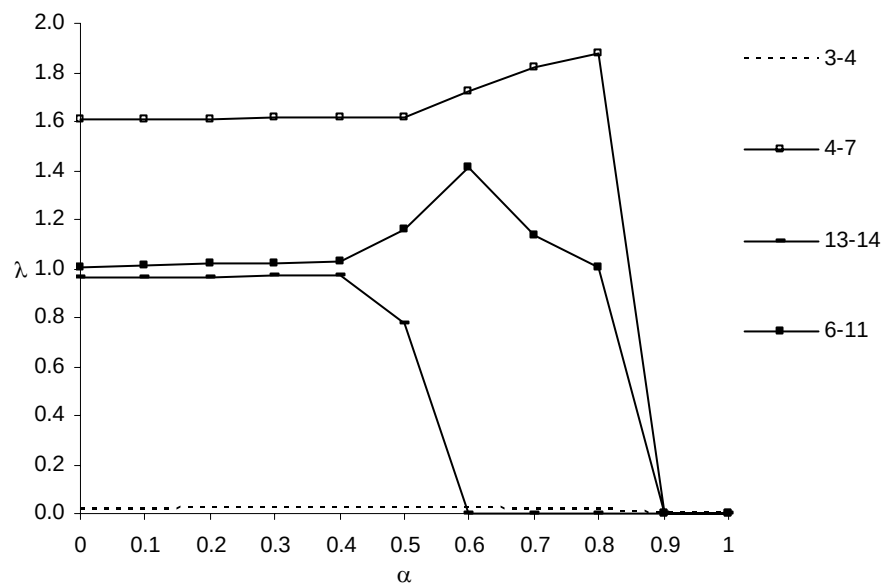


Figura 4.38 – Evolução dos valores duais das restrições na barra 9 entre [0, 1], sobre Figura 4.37 - reforço do ramo 4-9

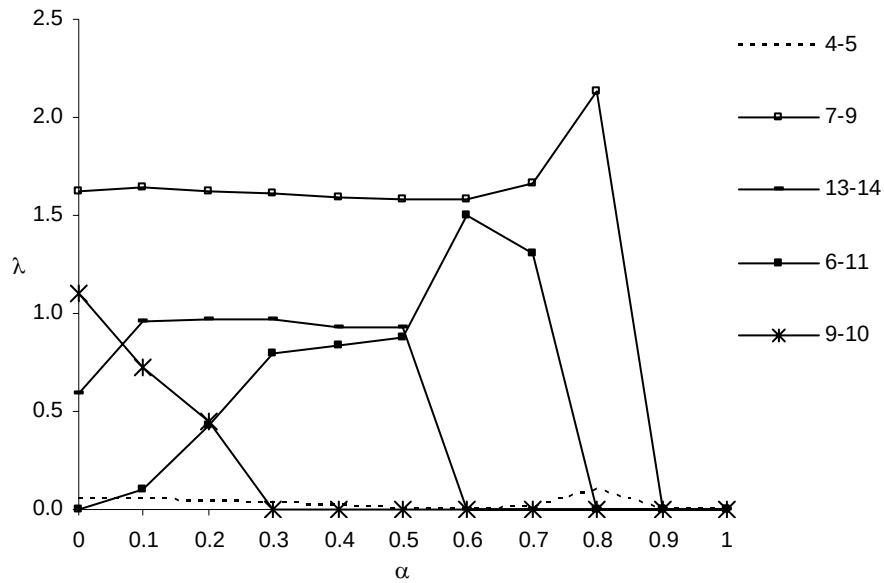


Figura 4.39 – Evolução dos valores duais das restrições na barra 9 entre [0, 1], sobre Figura 4.38 - reforço do ramo 4-7

Reforçando 4-7 conforme informação disponível na Figura 4.38, obtêm-se os valores duais da Figura 4.39 com destaque para o ramo 7-9. A severidade global e a severidade individual são agora de 0.6027 pu e 0.2 pu, respectivamente. Como novas restrições activas surge um ramo não adjacente (4-5) e um ramo adjacente (7-9).

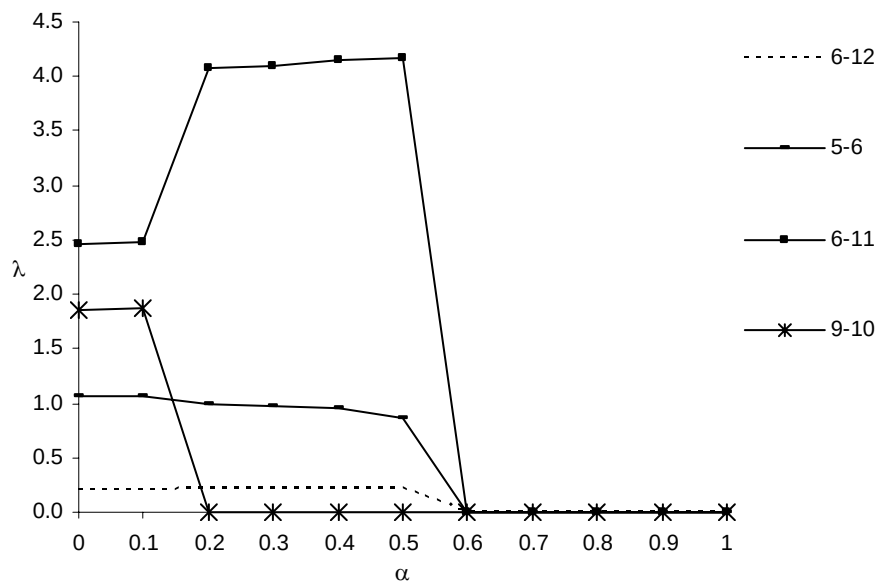


Figura 4.40 – Evolução dos valores duais das restrições na barra 9 entre [0, 1], sobre Figura 4.39 - reforço do ramo 7-9

O reforço do ramo 7-9 permite diminuir a severidade global de repressão de forma mais acentuada obtendo-se 0.4796 pu. A severidade individual de repressão é de 0.0769 pu e verifica-se pela primeira vez a redução do grau de repressão para 0.6. Como novas restrições activas podem identificar-se os ramos 5-6 e 6-12 ambos não adjacentes (Figura 4.40).

O ramo com maior valor dual após reforço de 6-11 é o ramo 13-14 (Figura 4.41). Neste caso a severidade global de repressão é ainda superior (0.4303 pu) ao valor tolerado. A severidade individual diminui em mais de 50% relativamente ao caso anterior. O grau de repressão desce novamente sendo de 0.4. As novas restrições activas correspondem aos ramos 6-13 e 13-14.

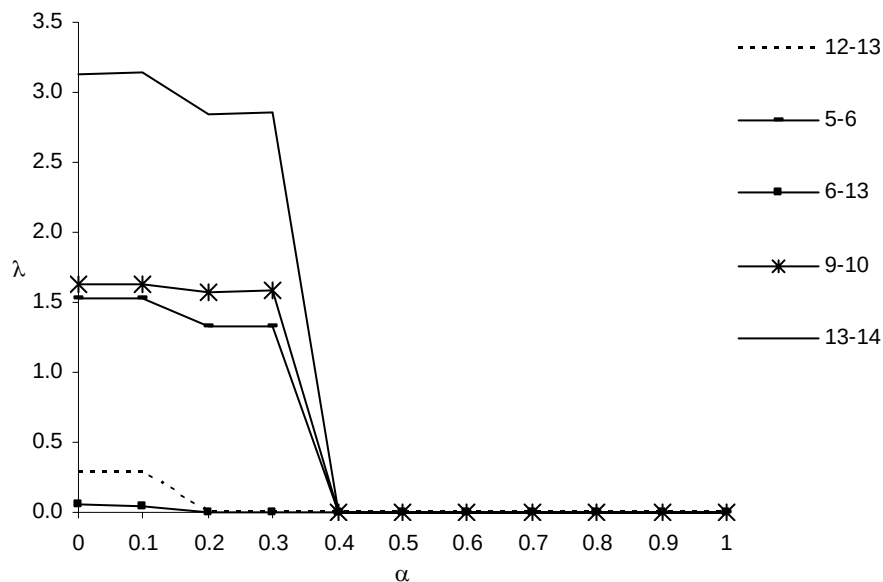


Figura 4.41 – Evolução dos valores duais das restrições na barra 9 entre [0, 1], sobre Figura 4.40 - reforço do ramo 6-11

Continuando com o processo, é escolhido o ramo 13-14 que permite reduzir a severidade global de repressão abaixo do valor tolerado, 0.3712 pu. A severidade individual no barramento 9 é pequena (0.002 pu) e corresponde a um grau de repressão de 0.1. O barramento 9 apresenta neste caso os valores duais da Figura 4.42.

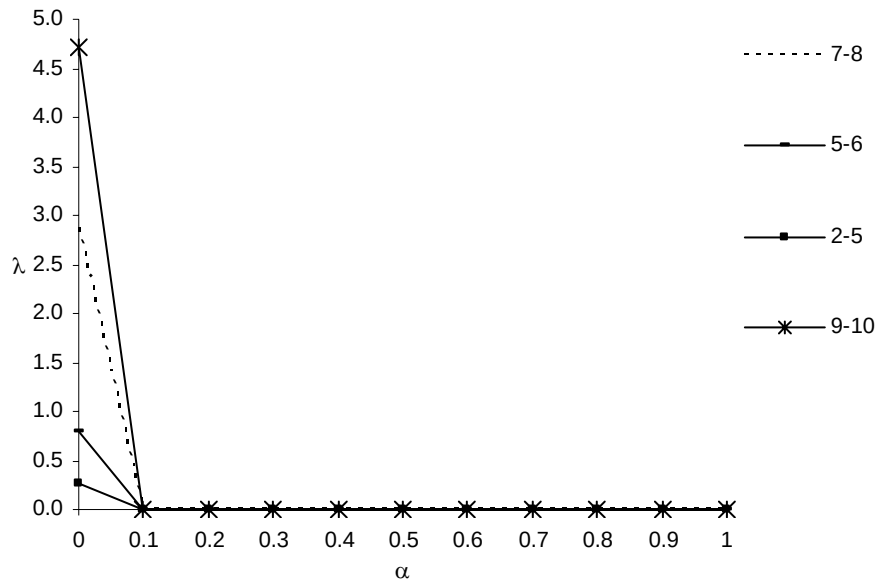


Figura 4.42 – Evolução dos valores duais das restrições na barra 9 entre [0, 1], sobre Figura 4.41 - reforço do ramo 13-14

Como se referiu, foi atingido um valor da repressão abaixo de 0.4 pu. Neste ponto constatou-se que também a repressão dos barramentos 10 e 14 se anulava (tal como sucedeu no modelo DC). Como o objectivo é obter a potência especificada no barramento 9, terá de se continuar com o processo até eliminar toda a repressão. Assim, procede-se ao reforço de 9-10 conforme sugerido por análise da Figura 4.42. Como resultado teremos a severidade individual de repressão do barramento 9 igual a 0.0 pu e a severidade global de repressão ainda mais baixa, de 0.3601 pu.

Na Figura 4.43 podem ser visualizados os resultados globais encontrados para o modelo completo. Verifica-se que o objectivo de diminuição da severidade global de repressão para valores até 0.4 pu é obtido no reforço 7 e que a eliminação da severidade individual de repressão neste barramento (obtenção da potência especificada) é obtida no último reforço. Ao longo do processo de redução da repressão no barramento 9, a repressão dos barramentos 10, 12, 13 e 14 é também influenciada. Concretamente a repressão é eliminada nos barramentos 10 (Figura 4.44) e 14 (Figura 4.45) e diminuída nos barramentos 12 (Figura 4.46) e 13 (Figura 4.47). A Figura 4.48 corresponde à repressão existente no barramento 9 no reforço 7 (Figura 4.43), podendo ser identificada a pequena repressão existente.

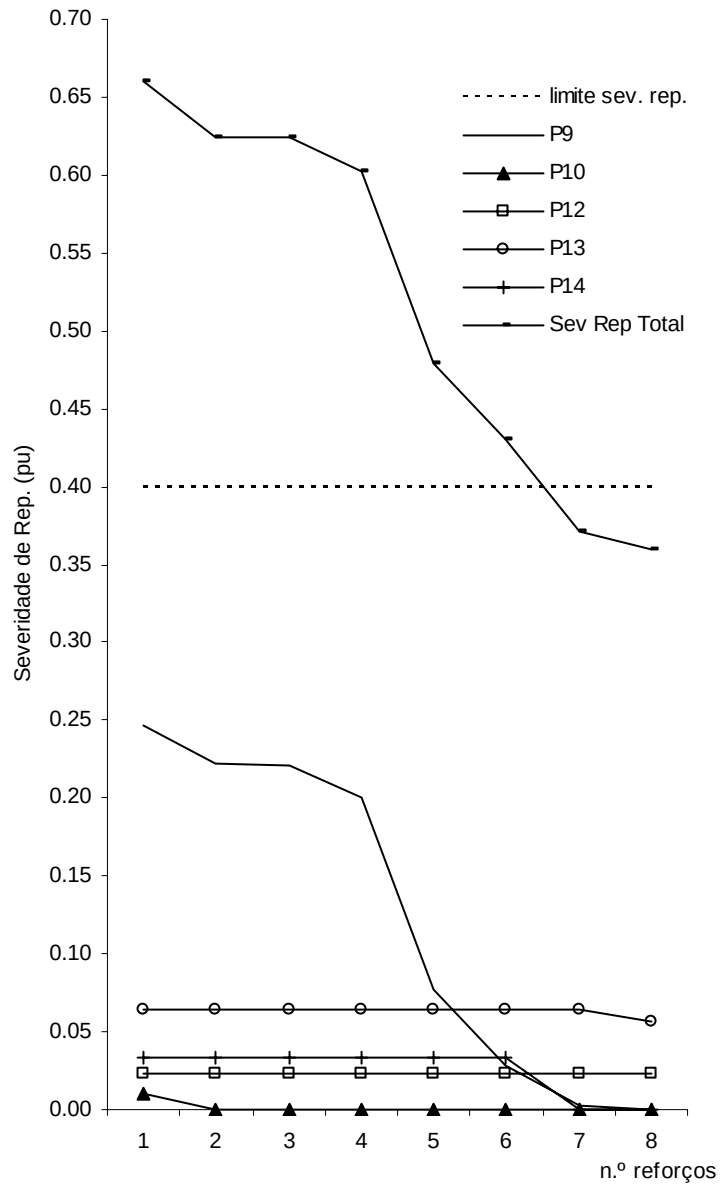


Figura 4.43 – Evolução dos resultados para a severidade de repressão

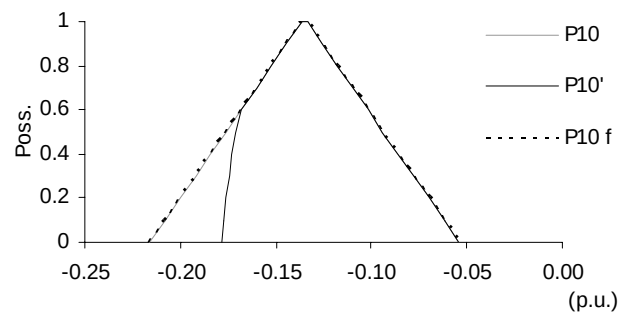


Figura 4.44 – Severidade individual de repressão no barramento 10

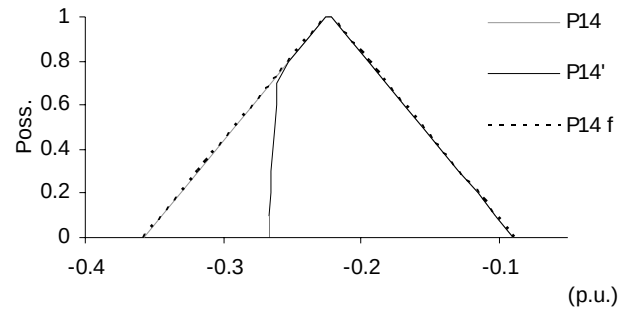


Figura 4.45 – Severidade individual de repressão no barramento 14

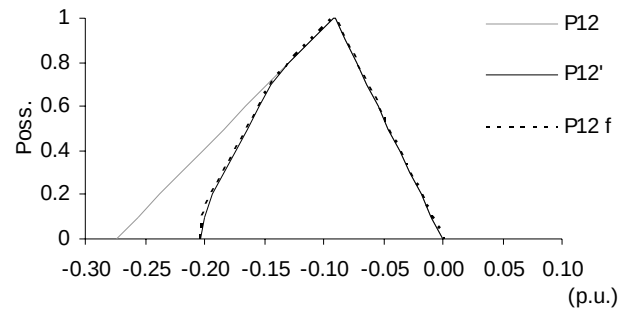


Figura 4.46 – Severidade individual de repressão no barramento 12

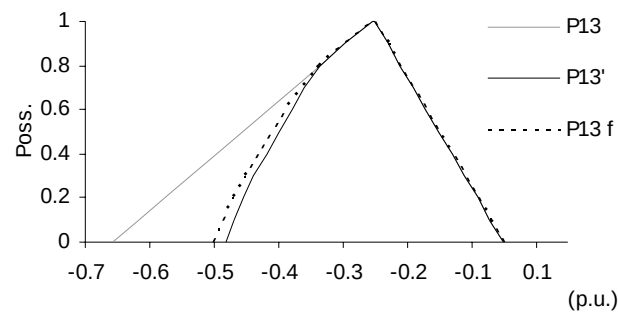


Figura 4.47 – Severidade individual de repressão no barramento 13

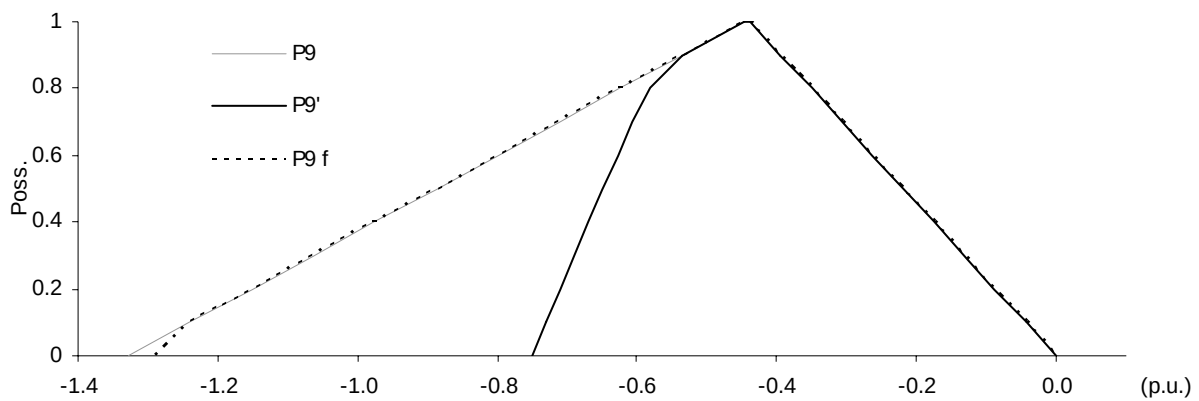


Figura 4.48 – Severidade individual de repressão no barramento 9

Em conclusão, a obtenção da potência especificada num barramento pode ser obtida com o reforço de apenas um ramo, por exemplo (Tabela 4.21) o caso do barramento 10 (após reforço do ramo 9-10). No entanto, como se demonstrou nesta secção a obtenção desta potência pode levar a casos em que seja necessário proceder ao reforço de mais de um ramo sucessivamente.

4.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O DC CFPF E AC CFPF

Sobre o uso do modelo DC e do modelo completo podem retirar-se conclusões importantes. Concretamente para os casos estudados, pôde observar-se que embora com valores diferentes, os barramentos com repressão são os mesmos em ambos os modelos (Tabela 4.10 e Tabela 4.20).

Sobre os valores duais do caso base existem diferenças quer nos valores, quer nos ramos que estão activos. Por exemplo no barramento 9, no caso AC (Tabela 4.16) o ramo 4-7 apresenta um valor dual de 0.6989 enquanto no caso DC (Tabela 4.7) apresenta um valor dual nulo. Contudo e em geral, os maiores valores duais activos no caso AC (ramos activos) correspondem aos maiores valores duais do caso DC. Com efeito, os resultados obtidos nas secções 4.4.3.1 e 4.5.4.1 indicam que para se obter a menor severidade global de repressão deverá ser considerado para ambos os modelos, o reforço do ramo 3-4 (Tabelas 4.11 e 4.21). Pode então dizer-se que o uso do modelo DC CFPF permite obter um conjunto de indicadores que são relevantes no modelo completo.

Num outro ponto (secção 4.4.3.2 e 4.5.4.2), verificou-se que os reforços sucessivos de ramos no caso DC e AC não seguiram a mesma ordem. No entanto, verifica-se que até se conseguir diminuir a severidade global de repressão para um valor desejado (0.4 pu) que os ramos utilizados para reforço foram os mesmos em ambos os casos. Notar que apesar das semelhanças o grau de repressão mantém-se praticamente em 0.9 ao longo do processo de reforço no modelo DC e vai sofrendo reduções no caso do modelo AC. Os barramentos cuja repressão foi afectada (10 e 12), além de obviamente o barramento 9, foram também os mesmos em ambos os casos. Na obtenção da potência especificada no modelo completo teve ainda de se proceder ao reforço do ramo 9-10. Nesta altura produziram-se pequenas diminuições de repressão nos barramentos 12 e 13.

As diferenças em ambos os modelos podem ser justificadas pela existência da potência reactiva gerada e consumida em alguns barramentos. Esta grandeza influencia os TP nos ramos e claro, os pedidos de transporte (onde se incluem as perdas) no caso AC.

Pelo conjunto de resultados obtidos, pode dizer-se que o modelo DC dará indicações muito interessantes do que deverá acontecer quando se aplica o modelo completo.

4.7 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentada uma metodologia que aplica o CFPF para identificar sugestões de reforços a realizar sobre a rede. Em seguida resumem-se algumas das suas potencialidades:

- Identificação dos ramos que influenciam directamente a repressão de cada barramento;
- Encontrar a potencialidade total ou parcial de um ramo na diminuição da repressão;
- Identificação dos ganhos máximos em termos de potência injectada (potência permitida) função do reforço dos ramos;
- Teste de várias situações de reforço de forma a permitir obter a potência injectada desejada (especificada) para cada barramento;

A metodologia apresentada é baseada na avaliação dos valores duais, resultado natural dos problemas de optimização. A leitura dos valores duais (Tabela 4.1) permite ao utilizador aferir de imediato sobre as sugestões de reforço mais promissoras para diminuir ou eliminar a repressão num dado barramento. Paralelamente e com base na mesma informação pode o utilizador também verificar quais os ramos que influenciam a repressão em mais de um barramento.

Após obter as sugestões de reforço torna-se necessário conhecer o valor para o qual se deve reforçar o ramo. No modelo linear (DC CFPF) o problema de optimização oferece, além dos valores duais, os intervalos onde estes são válidos permitindo a identificação de patamares. Desta forma e considerando as expressões fornecidas na secção 4.2, a obtenção da diminuição da severidade de repressão para um dado valor de reforço é simples de calcular. Contudo, para determinados valores de reforço poderá ser necessário o recurso a pós-optimizações. Também aqui são fornecidos os novos intervalos de validade dos valores duais. No caso do modelo completo coloca-se a questão da não linearidade. Os valores duais obtidos são derivadas de funções não lineares pelo que o seu valor apenas é válido na vizinhança da solução actual, não sendo possível a obtenção de patamares como no modelo linear. A forma encontrada para se poderem calcular valores de reforço específicos foi apresentada como processo incremental. Para verificação das metodologias de melhoria de adequação foram apresentados alguns exemplos baseados numa rede de teste. Foram obtidos bons resultados, com especial relevância no processo incremental, por se tratar de uma aplicação sobre um modelo não linear.

Os estudos efectuados permitiram também constatar que a acção de reforço de um ramo nem sempre conduz à obtenção da potência especificada. Nesta situação, a diminuição da repressão permite obter uma potência permitida menor que a pretendida (especificada).

Finalmente e baseados no conjunto de estudos apresentado, pode-se referir que o modelo DC oferece boas sugestões do que deverá acontecer quando se aplicar o modelo completo. Este caso poderá levar o utilizador a considerar a sua utilização quando pretender obter resultados de forma célere.

ANÁLISE DE SEGURANÇA

5.1 INTRODUÇÃO

A análise clássica de segurança do sistema composto considera métodos determinísticos e probabilísticos, ambos referidos no Capítulo 2.

O critério determinístico normalmente aplicado no sistema composto é o critério (N-1). O sistema deve suportar a saída de serviço de um qualquer componente sem que ocorra corte de carga (ou pelo menos o corte de carga não deverá ser superior a um valor predefinido). Nesta situação o sistema é adequado, caso contrário é considerado inadequado. Algumas entidades responsáveis pela tutela das redes utilizam também critérios considerando eventos múltiplos (critério n-2 ou critério n-1-1) onde se pressupõe que o sistema resiste. Podem neste caso, os eventos serem a saída de um qualquer componente de serviço quando se está a realizar manutenção num outro componente. Estes critérios são rígidos e não fornecem informação sobre o impacto de cada contingência sobre os pontos de carga.

As técnicas probabilísticas como as analíticas ou o Método de Monte Carlo (Capítulo 2) permitem analisar o impacto das contingências na fiabilidade do sistema através do cálculo de índices como a probabilidade do corte de carga [Billinton e Li, 1994]. Também a REN, SA utiliza, como se referiu, uma ferramenta baseada no MMC que simula centenas de milhares de cenários da rede com vista a avaliar a fiabilidade, neste caso do sistema composto, perante indisponibilidades de componentes.

Em seguida são enunciados os três principais objectivos deste capítulo:

Como primeiro objectivo, é pretendido mostrar como o CFPPF pode ser aplicado para avaliação da segurança da rede (estado estacionário) aplicada ao critério determinístico (N-k), sendo k a ordem da contingência seleccionada. A diferença para a formulação clássica é que, como se verá, o CFPPF permite obter os resultados, neste caso da adequação exclusiva da rede

de transporte para cada estado estudado, dando indicação da influência na severidade de repressão por cada contingência.

O segundo objectivo é proporcionar uma técnica capaz de minimizar o impacto das contingências tomando medidas (reforços) para limitar as consequências negativas para a rede. Este caso, não deve ser confundido com medidas correctivas como acontece nas versões clássicas baseadas em redespachos económicos utilizando o trânsito de potências óptimo ou corte de carga. De facto, o CFPF admite já na modelização dos pedidos de transporte todos os despachos possíveis. Neste objectivo o que se pretende é a definição de pontos interessantes a serem reforçados com vista a melhorar a adequação da rede avaliada pela repressão existente nos pedidos de transporte.

O terceiro e último objectivo deste capítulo consiste em mostrar como pode o CFPF ser utilizado em conjunto com critérios probabilísticos na análise de segurança.

5.2 INTEGRAÇÃO DO CFPP EM ANÁLISE DE SEGURANÇA (N-1)

5.2.1 Avaliação de estados de contingência

A utilização do CFPP na análise da adequação permite separar a análise da rede, da análise de produção e avaliar o efeito dos limites técnicos da rede sobre os pedidos de transporte de electricidade.

Nos resultados do problema já estão previstas situações de redespacho de produção. O redespacho visa evitar situações de corte de carga (critério de sucesso para a adequação na segurança N-k). No SFPP o operador dispõe já de todos os despachos possíveis. Ou seja, as distribuições de possibilidade especificadas para a produção nos barramentos admitem todos os cenários, não sendo portanto necessário realizar um redespacho.

Na Figura 5.1 está ilustrado o fluxograma relativo a este primeiro objectivo. A saída de resultados corresponderá à repressão existente nas várias situações de contingência. Um aspecto também importante é que, tal como no Capítulo 3 em que se definiram os índices de adequação, os resultados poderão ser para o sistema (globais) ou por barramento (locais).

Para cada situação de contingência simulada serão apresentados índices que quantificam a adequação da rede. Desta forma e do ponto de vista da análise da adequação conjugada com critérios determinísticos, pode identificar-se, dentro das contingências simuladas, quais as que constituem os piores casos. Na secção 5.4 será apresentado um exemplo baseado numa rede de teste onde serão simuladas todas as contingências de primeira ordem. Posteriormente serão sugeridos reforços para melhoria da adequação nas contingências mais severas.

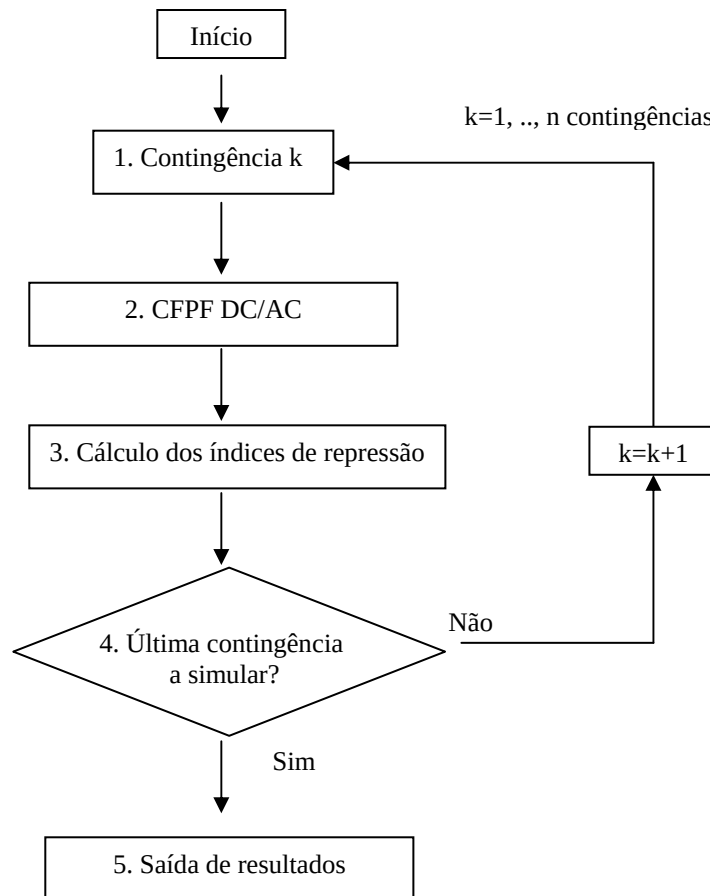


Figura 5.1 - Fluxograma para o CFPF aplicado ao critério N-k

5.2.2 Sugestões para reforços

A aplicação do CFPF conjugada com o critério determinístico (N-k) permite a identificação da repressão para cada contingência avaliada. Nesta aplicação, utiliza-se a análise de adequação nos pedidos de transporte de acordo com o Capítulo 3, sendo a sugestão de reforços a realizar na rede (com vista à melhoria da adequação) tratada a partir das metodologias apresentadas no Capítulo 4. O índice considerado é a severidade de repressão.

Podem ser identificados dois métodos para identificação dos reforços mais promissores na análise de adequação aplicada ao critério (N-k):

Método 1- Metodologia directa

a) Após simulação das contingências a avaliar e considerando que foi definida uma adequação mínima para a rede (severidade máxima de repressão), a aplicação da metodologia consiste em identificar e tratar as situações de contingência que ultrapassem o limite imposto. A Figura

5.2 representa um caso onde são representados os resultados de oito hipotéticas situações de contingência sendo o limite mínimo de adequação igual a 1 pu. Neste caso seriam seleccionadas as contingências 2, 3 e 7 para serem avaliadas.

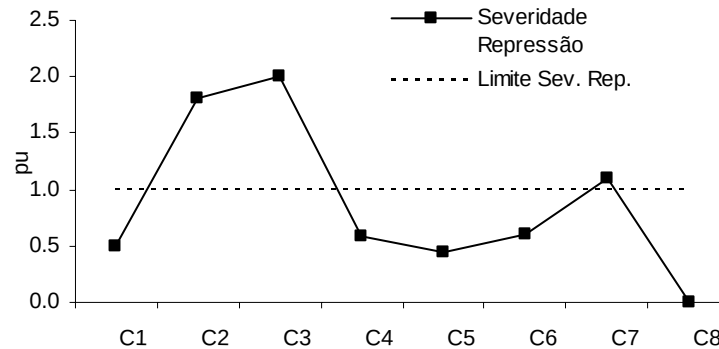


Figura 5.2 – severidade de repressão para um conjunto de contingências genérico

b) Das contingências escolhidas poderá começar-se pela que apresenta maior severidade de repressão (C3). Para esta contingência são estimadas as reduções da severidade ao nível do corte α desejado (normalmente $\alpha = 0$ para a este índice). Neste caso será obtida a Tabela 5.1, onde $\Delta P_{ik \text{ max}}$ representa o incremento no intervalo (dentro da validade de λ) partindo do limite inicial (rede na situação actual) do ramo.

Tabela 5.1 – Valores duais obtidos para a repressão base, seus intervalos de validade (partindo do limite do ramo) e diminuição estimada da repressão no corte (α) para a contingência com maior repressão

Ramo/nó	barra i1	barra i3	barra i5	barra i6	$\Delta P_{ik \text{ max}}$	DR
I1-k1	λa				$\Delta P_{ik \text{ max a}}$	$\lambda a. \Delta P_{ik \text{ max a}}$
i1-k4	λb				$\Delta P_{ik \text{ max b}}$	$\lambda b. \Delta P_{ik \text{ max b}}$
I2-k4		λd			$\Delta P_{ik \text{ max d}}$	$\lambda c. \Delta P_{ik \text{ max c}}$
I2-k5		λe			$\Delta P_{ik \text{ max e}}$	$\lambda d. \Delta P_{ik \text{ max d}}$
I3-k4			λf		$\Delta P_{ik \text{ max f}}$	$\lambda e. \Delta P_{ik \text{ max e}}$
I3-k6	λc			λg	$\Delta P_{ik \text{ max c}}, \Delta P_{ik \text{ max g}}$	$\lambda c. \Delta P_{ik \text{ max c}} + \lambda g. \Delta P_{ik \text{ max g}}$

Nesta tabela, a diminuição da severidade de repressão (DR) é calculada de acordo com o que se apresentou no Capítulo 4 para o modelo DC, expressões (4.3) e (4.6). No entanto é importante referir que para a DR e para o mesmo ramo poderão ser obtidos intervalos diferentes para $\Delta P_{ik \text{ max}}$. Neste caso e considerando apenas a perspectiva da segurança (ignorando questões económicas) deverá ser escolhido o intervalo que corresponde à maior DR para garantir todos os reforços. No modelo completo teria de ser observado o processo incremental para obter a diminuição da severidade de repressão para um valor específico de reforço.

c) A maior DR obtida permitirá identificar o ramo (i-k) mais promissor (reforço). Contudo, num estudo mais elaborado e do ponto de vista da severidade, todas as diminuições as situações de DR deverão ser observadas. Pois uma pequena diminuição da severidade de repressão poderá ser suficiente para satisfazer a adequação mínima para a rede (exemplo da contingência C7, Figura 5.2). Por outro lado, o reforço efectuado poderá não ser suficiente para o objectivo citado. Neste caso teria de ser obtida uma nova Tabela 5.1 e o processo repetido (situação de reforços sucessivos).

d) Após escolha do ramo poderão ser analisadas eventuais consequências do reforço sobre outras situações de contingência que apresentem severidade de repressão acima do valor máximo tolerável (1 pu para a Figura 5.2).

e) Se para o exemplo fornecido (Figura 5.2), a escolha do reforço em c) não influenciou a repressão de C3 e C7, então o passo seguinte é escolher a próxima contingência para a situação actual da rede (após reforço do ramo i-k) que viola o limite mínimo de adequação desejado. Em seguida retoma-se a a) e repete-se o processo até que todas as contingências apresentem uma severidade de repressão adequada, conforme limite definido.

A metodologia directa para o conjunto de estudos obtidos poderia ser integrada com o processo de avaliação de estados de contingência (secção 5.2.1). Neste caso, à medida que se avalia cada contingência verifica-se de imediato se a repressão obtida está abaixo da repressão tolerada para a rede. A Figura 5.2 representa um fluxograma que poderia ser utilizado para conduzir uma implementação computacional.

O bloco 1 identifica a contingência em estudo. Por exemplo, pode tratar-se de todas as contingências de primeira ordem ou de um conjunto de contingências de segunda ordem (ou superior). Em seguida deve-se definir a máxima severidade de repressão tolerada para a rede (bloco 2). Para calcular os índices de repressão para a situação de contingência em estudo (bloco 4) terá de ser executado o DC CFPF ou AC CFPF (bloco 3). Os valores obtidos para os índices de repressão devem ser comparados com um valor mínimo de adequação (bloco 5). Em caso de violação da adequação mínima exigida para a rede, em seguida são identificados os ramos mais promissores para efeitos de reforço (blocos 6-8).

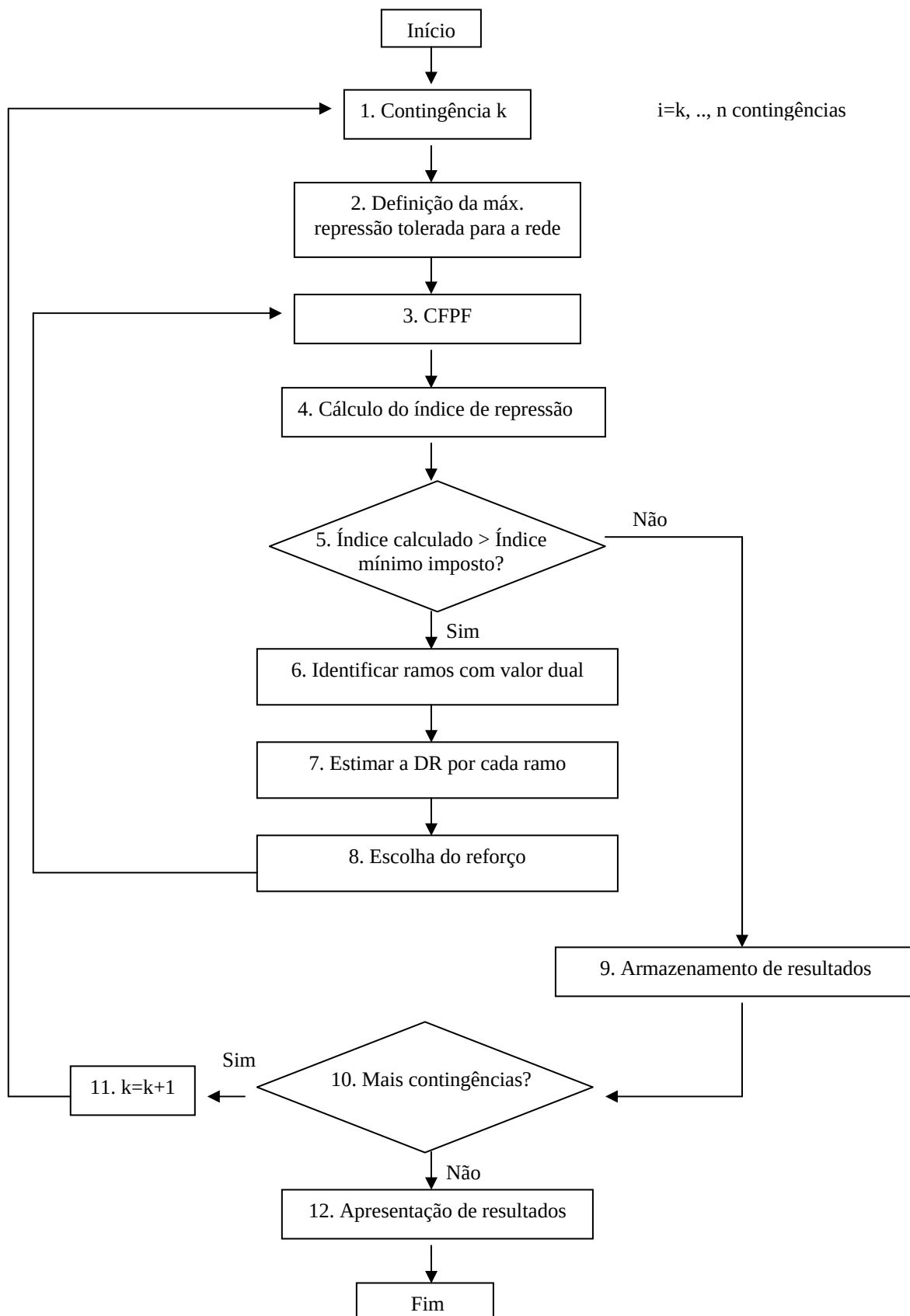


Figura 5.3 – Fluxograma para sugestões de reforço quando se aplica o CFPP ao critério N-k

Refira-se que tal como no Capítulo 4, os valores duais apenas são válidos para uma restrição específica devendo por este motivo ser reforçado apenas um ramo de cada vez. Neste processo pode haver lugar a reforços sucessivos de ramos até que se atinja a adequação desejada. Outro aspecto importante relaciona-se com a eventual necessidade de avaliar o efeito dos reforços (blocos 6-8) em todas as outras contingências onde as restrições destes ramos poderão estar activas. Neste caso estaríamos perante uma avaliação completa, adiante designada por *metodologia completa*. No caso da metodologia directa esta situação apenas terá interesse em outras situações de contingência que apresentem repressão acima do valor máximo tolerável (bloco 2).

A apresentação das metodologias foi orientada para a diminuição da severidade de repressão. Contudo, podem ser adaptadas com facilidade se for pretendida a redução do grau de repressão. Neste caso teria de se proceder da mesma forma que indicado no Capítulo 4 e verificar para cada contingência quais os barramentos com maior grau de repressão. A Tabela 5.1 seria relativa ao corte de nível α nesses barramentos, responsável por um determinado grau de repressão. A maior DR daria indicação do ramo mais promissor a ser reforçado.

Método 2- Metodologia completa

- a) Identificar para cada contingência os ramos cujas restrições estão activas e obter a diminuição da severidade de repressão para cada um destes ramos. Ou seja irá existir uma tabela semelhante à Tabela 5.1 para cada contingência (C1 a C7 conforme exemplo da Figura 5.2).
- b) Na posse da informação de a), pode ser construída uma tabela global com a influência de cada ramo na repressão de cada contingência (Tabela 5.2). Se for somada a diminuição de repressão obtida em cada contingência, identifica-se o ramo que maior impacto terá no conjunto das contingências.
- c) Em seguida poderá escolher-se o ramo a reforçar e o valor do reforço.
- d) O problema de optimização (CFPF) deverá ser novamente resolvido e verificado se as situações de contingência satisfazem os critérios mínimos de adequação.

e) Caso tal não suceda poderá ser produzida uma nova tabela (como a Tabela 5.2) e escolhido um novo ramo para reforçar (pós optimizações sucessivas).

Tabela 5.2 – Diminuição da Repressão por ramo e por situação de contingência

Ramo\contingência	C1	C2	...	CY	Total
1	$DR_{R1, C1}$	...		$DR_{R1, CY}$	$\sum_{q=1}^Y DR_{R1, Cq}$
.	.			.	
.	.			.	
.	.			.	
m	$DR_{Rm, C1}$	...		$DR_{Rm, CY}$	$\sum_{q=1}^Y DR_{Rm, Cq}$

Esta metodologia é interessante quando se pretende conhecer o impacto dos reforços sobre todas as contingências. No entanto exige mais recursos computacionais.

5.3 INTEGRAÇÃO DO CFPP EM ANÁLISE DE SEGURANÇA DO TIPO PROBABILÍSTICO

Na análise clássica de segurança considerando critérios probabilísticos é utilizado o sistema composto sendo os estados sorteados relativos a elementos do sistema de produção (geradores) e a elementos do sistema de transporte (linhas, transformadores). Nesta situação cada estado do sistema pode ser dado por (5.1) onde existem p componentes do sistema de transporte e $n-p$ componentes do sistema produtor.

$$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_p \ x_{p+1} \ \dots \ x_n] \quad (5.1)$$

Aplicando o CFPP e o Método de Monte Carlo, seriam sorteados apenas os estados relativos ao sistema de transporte pelo que o conjunto de estados x' em que o sistema poderá residir será bastante menor (5.2):

$$X' = [x'_1 \ \dots \ x'_p] \quad (5.2)$$

Contudo e em ambos os casos poderá ser calculada uma amostra, N (Capítulo 2, secção 2.6), sendo os estados a sortear obtidos dessa amostra. Como resultado da avaliação dos estados ter-se-á um valor estimado, que no caso do modelo composto corresponderá, por exemplo à perda de carga esperada (PC) e no caso do modelo CFPP corresponderá à repressão esperada (R) ou à severidade de repressão esperada. Dado que o CFPP é um modelo possibilístico, importa também referir que a obtenção dos índices incluindo critérios probabilísticos no modelo composto, tem também uma versão difusa [Saraiva, 1992]. Neste caso é utilizado um trânsito de potência óptimo difuso (na língua inglesa *Fuzzy Optimal Power Flow - FOPF*) onde se obtém a perda de carga esperada, $\tilde{PC}$, sob a forma de uma distribuição de possibilidade. Da mesma forma que no caso determinístico, a agregação de todos os estados sorteados permite estimar o valor esperado, que neste caso é também difuso (5.3):

$$\hat{E}(\tilde{PC}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{PC}(x_i) \quad (5.3)$$

Se por outro lado, o sistema composto a estudar for de pequena dimensão, então o valor esperado para a perda de carga é dado por (5.4) onde $p(x_i)$ representa a probabilidade de ocorrência do estado i do sistema.

$$E\left(\tilde{PC}\right)=\sum_{i=1}^n \tilde{PC}(x_i).p(x_i) \quad (5.4)$$

No caso do CFPF os estados a considerar incluem apenas os componentes da rede de transporte. Para cada estado simulado pode ser obtido um indicador possibilístico, a repressão global e um indicador determinístico, a severidade global de repressão. A repressão calcula-se, para cada barramento por desconvolução. A severidade da repressão poderá ser calculada pelo somatório de todas as áreas relativas à repressão em cada barramento para cada estado sorteado. Integrando o CFPF com critérios probabilísticos, onde cada estado em que o sistema pode residir tem uma determinada probabilidade, pode-se obter a *repressão global esperada* e a *severidade global esperada de repressão*.

Para pequenos sistemas, a repressão global esperada ($\tilde{R}$) e a severidade global esperada de repressão (S) serão dadas, respectivamente por (5.5) e (5.6), onde p representa o número de componentes na rede de transporte.

$$E\left(\tilde{R}\right)=\sum_{i=1}^p \tilde{R}(x'_i).p(x'_i) \quad (5.5)$$

$$E(S)=\sum_{i=p+1}^p S(x'_i).p(x'_i) \quad (5.6)$$

No caso de sistemas de grande dimensão e recorrendo ao Método de Monte Carlo para realizar o sorteio dos estados, os indicadores referidos seriam dados, respectivamente, por (5.7) e (5.8). Nesta situação teriam de ser analisados entre outros aspectos, a precisão desejada e a convergência, [Billinton e Li, 1994]. A dimensão da amostra, N corresponde neste caso apenas aos estados relativos aos componentes da rede de transporte. Relativamente ao FOPF, no CFPF quer a repressão global esperada quer a severidade global esperada de repressão incluem repressões de produção, aspecto importante na avaliação dos pedidos de transporte (que são de produção e de procura de electricidade) em ambiente de mercado.

$$\hat{E}(\tilde{R}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{R}(x'_i) \quad (5.7)$$

$$\hat{E}(S) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S(x'_i) \quad (5.8)$$

Considerando a implementação de um MMC, poderia esta corresponder ao fluxograma da Figura 5.4. Em cada iteração k é sorteado um estado da rede e calculada a repressão e respectiva severidade. O critério de convergência é conduzido pela severidade de repressão.

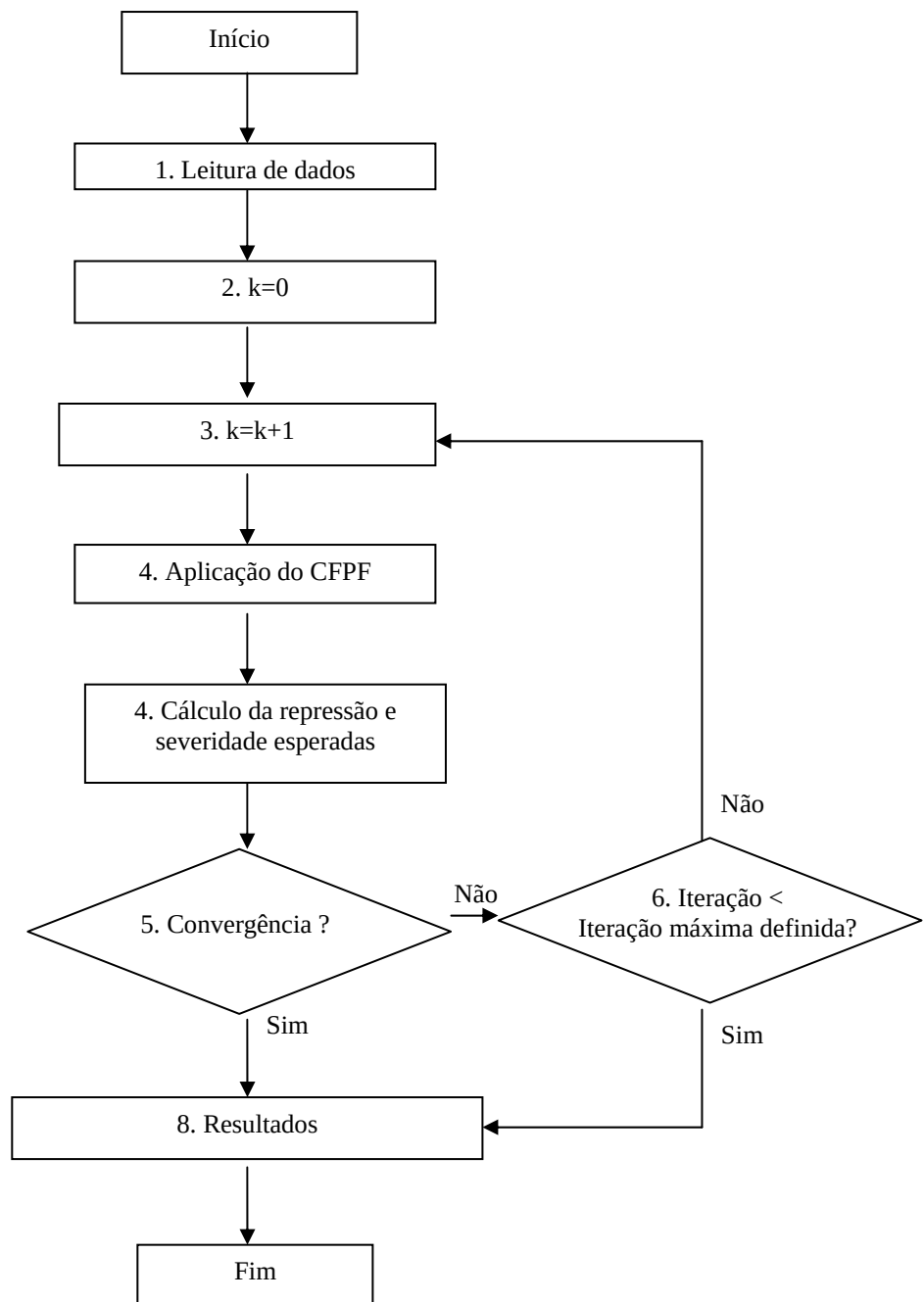


Figura 5.4 - Algoritmo do MMC aplicando o CFPF na adequação da rede

Desta forma (CFPF), estão a ser considerados modelos probabilísticos para falhas dos componentes da rede de transporte e modelos possibilísticos para tratamento dos pedidos de transporte (Figura 5.5).

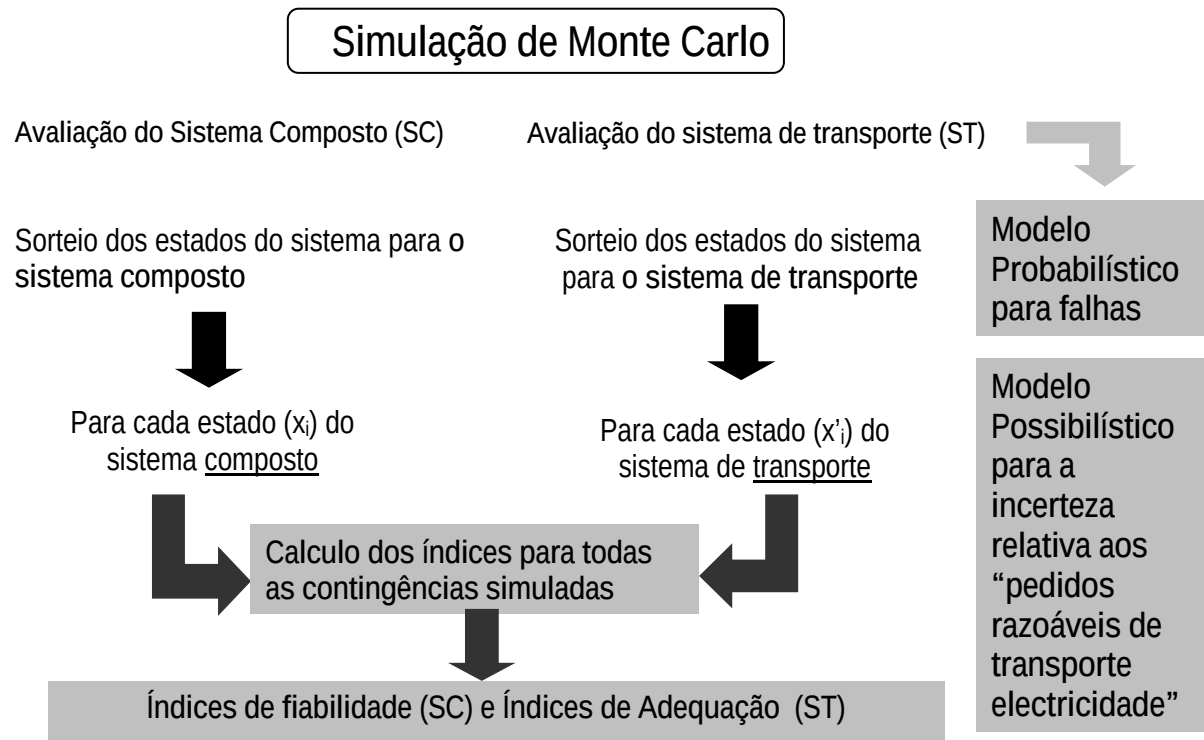


Figura 5.5 – Esquematização do CFPF integrando estudos de Monte Carlo

Finalmente importa referir que a aplicação do CFPF a critérios probabilísticos para sistemas de grande dimensão é um ponto a merecer atenção no futuro, dado que o CFPF apresenta tempos de cálculo ainda consideráveis (Capítulo 3).

5.4 INTEGRAÇÃO DO CFPF EM ANÁLISE DE SEGURANÇA (N-1): ESTUDO DE CASO

5.4.1 Caso base e avaliação dos estados de contingência

Para demonstração do primeiro objectivo (Figura 5.1), aplicação do CFPF na análise da adequação da rede utilizando o critério N-k é utilizada a rede de 14 barramentos do IEEE. Os dados para incerteza (produção e carga) são diferentes relativamente ao Capítulo 4. De facto no Capítulo 4, onde esta rede foi utilizada, consideraram-se o incremento de alguns valores de carga e pontos característicos para os extremos das distribuições de possibilidade largos (para promover a ilustração dos conceitos). Neste capítulo, os valores dos pontos extremos são mais realistas uma vez que a repressão surge tipicamente na sequência de contingências. Os estudos seguintes são realizados para o modelo DC sendo considerada a incerteza modelizada sob a forma de distribuições de possibilidade rectangulares (intervalos) para clareza de exposição (outras distribuições de possibilidade poderiam ser consideradas como as triangulares ou trapezoidais). Os valores característicos para os pontos extremos das distribuições de possibilidade rectangulares utilizados para caracterizar a incerteza dos pedidos de procura foram para a produção e a carga, respectivamente [0.8; 1.2] e [0.5; 1.5]. Estes valores foram aplicados sobre os valores determinísticos, disponíveis em [www.ee.washington.edu/research/pstca, 2008]. Foi considerada uma potência de base de 100 MW. O critério determinístico considerado foi segurança (N-1). Dado que se pretende avaliar a adequação da rede de transporte, as contingências consideradas incluem apenas os ramos. Em consequência, não são considerados outros elementos como o maior grupo gerador ou baterias de condensadores (existente por exemplo no barramento 9 da rede considerada). Os resultados serão obtidos para o índice, severidade de repressão. Em seguida foi realizado o cálculo dos trânsitos de potência activa sem limites nos ramos (SFPF) com vista à obtenção dos valores de referência (Capítulo 3), tendo-se obtido os valores da Tabela 5.3. Nesta tabela, por comodidade, os valores na coluna à direita representam o limite de trânsito de potência activa a utilizar nos estudos com restrição à capacidade de transporte nos ramos (CFPF).

As Tabelas 5.4 a 5.6 apresentam, respectivamente os casos seguintes: potência activa especificada nos barramentos, resultados para a potência activa injectada nos barramentos quando se consideram limites nos ramos e resultados para o trânsito de potência activa considerando também os limites nos ramos.

Tabela 5.3 - Trânsito de potência activa (SFPP DC) sem limite nos ramos e valor utilizado para os limites nos estudos seguintes ($P_{ik \max}$), pu

P_{ik}	$\alpha(0-) = \alpha(1-)$	$\alpha(0+) = \alpha(1+)$	$P_{ik \max}$
1-2	1.1042	1.8534	1.800
1-5	0.5132	0.9091	1.780
2-3	0.4156	0.9854	0.830
2-4	0.3509	0.7536	0.640
2-5	0.2368	0.5813	0.500
3-4	-0.5642	0.0812	0.480
4-5	-0.9244	-0.3224	0.970
4-7	0.1255	0.4542	0.320
4-9	0.0720	0.2606	0.190
5-6	0.2180	0.6237	0.500
6-11	-0.0215	0.1475	0.090
6-12	0.0345	0.1164	0.090
6-13	0.0740	0.2666	0.200
7-8	0.0000	0.0000	10.000
7-9	0.1255	0.4542	0.340
9-10	-0.0420	0.1659	0.180
9-14	-0.0022	0.2007	0.140
10-11	-0.1117	0.0556	0.130
12-13	-0.0253	0.0542	0.050
13-14	-0.0353	0.1348	0.076

Tabela 5.4 - Potência activa injectada especificada (pu)

P_i	$\alpha(0-) = \alpha(1-)$	$\alpha(0+) = \alpha(1+)$
P1	1.7520	2.6280
P2	-0.0055	0.3715
P3	-1.4130	-0.4710
P4	-0.7170	-0.2390
P5	-0.1140	-0.0380
P6	-0.1680	-0.0560
P7	0.0000	0.0000
P8	0.0000	0.0000
P9	-0.4425	-0.1475
P10	-0.1350	-0.0450
P11	-0.0525	-0.0175
P12	-0.0915	-0.0305
P13	-0.2025	-0.0675
P14	-0.2235	-0.0745

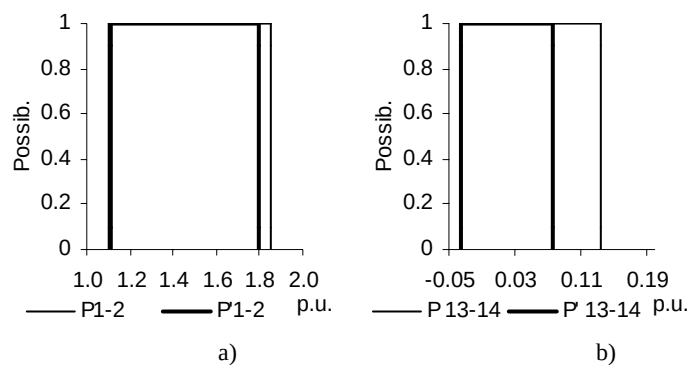
São evidentes os congestionamentos existentes nos ramos quando se comparam as Tabelas 5.3 e 5.6. As Figuras 5.6a) e 5.6b) ilustram esses congestionamentos nos ramos 1-2 e 13-14. O real interesse da aplicação do CFPP vem com a repressão nos barramentos pois é essa que indica a adequação da rede. As Figuras 5.7a) a 5.7b) ilustram as repressões encontradas (barramentos 3 e 14).

Tabela 5.5 - Potência activa injectada, modelo CFPP (pu)

P_i	$\alpha(0-) = \alpha(1-)$	$\alpha(0+) = \alpha(1+)$
P1	1.7520	2.6280
P2	-0.0055	0.3715
P3	-1.3100	-0.4710
P4	-0.7170	-0.2390
P5	-0.1140	-0.0380
P6	-0.1680	-0.0560
P7	0.0000	0.0000
P8	0.0000	0.0000
P9	-0.4425	-0.1475
P10	-0.1350	-0.0450
P11	-0.0525	-0.0175
P12	-0.0915	-0.0305
P13	-0.2025	-0.0675
P14	-0.2160	-0.0745

Tabela 5.6 – Trânsito de potência activa com limites nos ramos, pu

P_{ik}	$\alpha(0-) = \alpha(1-)$	$\alpha(0+) = \alpha(1+)$	$P_{ik \max}$
P' 1-2	1.1099	1.8000	1.800
P' 1-5	0.5132	0.8451	1.780
P' 2-3	0.4159	0.8300	0.830
P' 2-4	0.3509	0.6400	0.640
P' 2-5	0.2368	0.4955	0.500
P' 3-4	-0.4800	0.0394	0.480
P' 4-5	-0.8490	-0.3274	0.970
P' 4-7	0.1274	0.3200	0.320
P' 4-9	0.0731	0.1836	0.190
P' 5-6	0.2180	0.5000	0.500
P' 6-11	-0.0215	0.0940	0.090
P' 6-12	0.0345	0.0950	0.090
P' 6-13	0.0740	0.2000	0.200
P' 7-8	0.0000	0.0000	10.000
P' 7-9	0.1274	0.3200	0.340
P' 9-10	-0.0315	0.1659	0.180
P' 9-14	0.0083	0.1400	0.140
P' 10-11	-0.0765	0.0556	0.130
P' 12-13	-0.0253	0.0401	0.050
P' 13-14	-0.0353	0.0760	0.076

**Figura 5.6 – Distribuição de possibilidade para o TP activa injectada nos ramos a) 1-2 e b) 13-14**

Tratando-se de intervalos, o grau de repressão poderá variar entre 0 (repressão nula) e 1 (repressão máxima). Ou seja, para se fosse desejado eliminar o grau de repressão teria de se actuar sobre a severidade de repressão. A severidade individual de repressão é, respectivamente de 0.1030 pu e de 0.0075 pu para os barramentos 3 e 14 (Figura 5.7). A severidade de repressão global do sistema é de 0.1105 pu (11.05 MW).

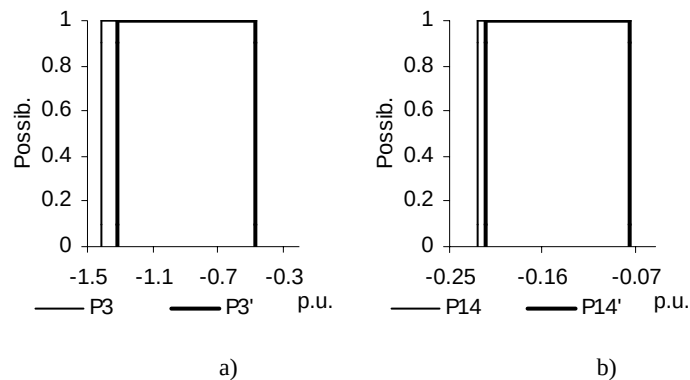


Figura 5.7 – Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada nos barramentos 3 e 14

Em seguida (Tabela 5.7) apresentam-se os reforços marginais obtidos para o caso base. De referir que estes valores são válidos para qualquer corte de nível α dado que, a modelização da incerteza, corresponde a potências injectadas dadas por distribuições de possibilidade rectangulares. A análise dos resultados permite concluir que a repressão no barramento 3 (Figura 5.7a) é devida ao congestionamento dos ramos 2-3 e 3-4. Já a repressão no barramento 14 (Figura 5.7b) é devida aos ramos 9-14 e 13-14.

Neste caso, as repressões existentes nos barramentos 3 e 14 são devidas a congestionamentos em ramos adjacentes. Note-se que esta situação não é uma regra. De facto, mais adiante neste capítulo poderá verificar-se que a existência de uma determinada contingência num ramo corresponderá a afectar um barramento nem sempre será adjacente. Este caso já acontecia também nos casos discutidos no Capítulo 4.

Nas Tabelas 5.8 a 5.12 são apresentados os resultados para a severidade individual de repressão (por barramento) e para a severidade global de repressão (rede) calculados por cada situação de contingência (N-1).

Tabela 5.7 – Valores duais obtidos para a repressão base (P_{ikmax} da Tabela 5.2) e para os cortes α extremos (0- e 0+)

Ramo\Nó	barra 3	Barra 14	Ramo\Nó	barra 3	barra 14
1-2	0.0000	0.0000	6-11	0.0000	0.0000
1-2	0.0000	0.0000	6-11	0.0000	0.0000
1-5	0.0000	0.0000	6-12	0.0000	0.0000
1-5	0.0000	0.0000	6-12	0.0000	0.0000
2-3	1.0000	0.0000	6-13	0.0000	0.0000
2-3	0.0000	0.0000	6-13	0.0000	0.0000
2-4	0.0000	0.0000	7-8	0.0000	0.0000
2-4	0.0000	0.0000	7-8	0.0000	0.0000
2-5	0.0000	0.0000	7-9	0.0000	0.0000
2-5	0.0000	0.0000	7-9	0.0000	0.0000
3-4	0.0000	0.0000	9-10	0.0000	0.0000
3-4	1.0000	0.0000	9-10	0.0000	0.0000
4-5	0.0000	0.0000	9-14	0.0000	1.0000
4-5	0.0000	0.0000	9-14	0.0000	0.0000
4-7	0.0000	0.0000	10-11	0.0000	0.0000
4-7	0.0000	0.0000	10-11	0.0000	0.0000
4-9	0.0000	0.0000	12-13	0.0000	0.0000
4-9	0.0000	0.0000	12-13	0.0000	0.0000
5-6	0.0000	0.0000	13-14	0.0000	1.0000
5-6	0.0000	0.0000	13-14	0.0000	0.0000
α	0-	0-		0-	0-

Tabela 5.8 – Severidade de repressão para o caso base e para as situações de contingência 1 a 4 (pu)

	Segurança N		Contingência 1		Contingência 2		Contingência 3		Contingência 4	
	Caso base		1-2		1-5		2-3		2-4	
Nó	0-	0+	0-	0+	0-	0+	0-	0+	0-	0+
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.8480	0.0000	0.8280	0.0000	0.7770	0.0000	0.3439
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0647	0.0000	0.0535	0.0000	0.2930	0.0000	0.0000
3	0.1030	0.0000	0.5777	0.0000	0.2118	0.0000	0.9330	0.0000	0.2349	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.2825	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000
	Sev. Rep.	0.1105	Sev. Rep.	1.7804	Sev. Rep.	1.1008	Sev. Rep.	2.0105	Sev. Rep.	0.5863

Onde as colorações têm o seguinte significado:

#.####	Nova Severidade de Repressão Individual
#.####	Aumento da Severidade de Repressão Individual
#.####	Sev. Repressão já existente no caso base que se manteve inalterada

Tabela 5.9 – Severidade de repressão para o caso base e para as situações de contingência 5 a 8 (pu)

	Segurança N		Contingência 5		Contingência 6		Contingência 7		Contingência 8	
	Caso base		2-5		3-4		4-5		4-7	
Nó	0-	0+	0-	0+	0-	0+	0-	0+	0-	0+
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.3096	0.0000	0.0109	0.0000	0.6507	0.0000	0.0147
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1616	0.0000	0.0000
3	0.1030	0.0000	0.1342	0.0000	0.5830	0.0000	0.3273	0.0000	0.1030	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2369	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0284	0.0000	0.2293	0.0000
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0312	0.0000
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000	0.0791	0.0000
	Sev. Rep.	0.1105	Sev. Rep.	0.4512	Sev. Rep.	0.6014	Sev. Rep.	1.4122	Sev. Rep.	0.4573

Tabela 5.10 – Severidade de repressão para o caso base e para as situações de contingência 9 a 12 (pu)

	Segurança N		Contingência 9		Contingência 10		Contingência 11		Contingência 12	
	Caso base		4-9		5-6		6-11		6-12	
Nó	0-	0+	0-	0+	0-	0+	0-	0+	0-	0+
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1344	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1030	0.0000	0.1030	0.0000	0.1030	0.0000	0.1030	0.0000	0.1030	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1065	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	0.0993	0.0000	0.2349	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0660	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0555	0.0000	0.0000	0.0000	0.0215	0.0000
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1295	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000
14	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000	0.1435	0.0000	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000
	Sev. Rep.	0.1105	Sev. Rep.	0.2098	Sev. Rep.	0.9852	Sev. Rep.	0.1105	Sev. Rep.	0.1355

Por exemplo, avaliando a informação da Tabela 5.10 é possível concluir que a saída de serviço do ramo 5-6 provoca o aumento da severidade de repressão em 0.8747 pu. Este aumento é devido a novas repressões que surgem nos barramentos 1, 6, 9, 10, 11, 12, 13 e ao aumento da repressão no barramento 14. Um aspecto interessante a evidenciar é o facto de surgirem repressões em barramentos não adjacentes ao ramo onde se estuda a contingência.

Tabela 5.11 – Severidade de repressão para o caso base e para as situações de contingência 12 a 16 (pu)

	Segurança N		Contingência 13		Contingência 14		Contingência 15		Contingência 16	
	Caso base		6-13		7-8		7-9		9-10	
Nó	0-	0+	0-	0+	0-	0+	0-	0+	0-	0+
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0142	0.0000	0.0000	0.0000	0.0147	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1030	0.0000	0.1030	0.0000	0.1030	0.0000	0.1030	0.0000	0.1030	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	0.1426	0.0000	0.0000	0.0000	0.2293	0.0000	0.0000	0.0000
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0312	0.0000	0.0585	0.0000
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000
12	0.0000	0.0000	0.0438	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	0.0000	0.0000	0.1130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14	0.0075	0.0000	0.1066	0.0000	0.0075	0.0000	0.0791	0.0000	0.0075	0.0000
	Sev. Rep.	0.1105	Sev. Rep.	0.5232	Sev. Rep.	0.1105	Sev. Rep.	0.4573	Sev. Rep.	0.1725

Tabela 5.12 – Severidade de repressão para o caso base e para as situações de contingência 17 a 20 (pu)

	Segurança N		Contingência 17		Contingência 18		Contingência 19		Contingência 20	
	Caso base		9-14		10-11		12-13		13-14	
Nó	0-	0+	0-	0+	0-	0+	0-	0+	0-	0+
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1030	0.0000	0.1030	0.0000	0.1030	0.0000	0.1030	0.0000	0.1030	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	0.0000	0.0000	0.0369	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14	0.0075	0.0000	0.1475	0.0000	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000	0.0835	0.0000
	Sev. Rep.	0.1105	Sev. Rep.	0.2874	Sev. Rep.	0.1105	Sev. Rep.	0.1105	Sev. Rep.	0.1865

A informação disponível permite identificar as severidades globais de repressão para cada contingência (Figura 5.8). Se o critério de adequação para a rede fosse severidade de repressão igual a 2.5 pu, a rede seria considerada adequada uma vez que para cada contingência simulada o valor deste índice está sempre abaixo de 2.5. Se por outro lado esse critério correspondesse a 1.5 pu a rede seria considerada inadequada já que a saída de serviço dos ramos 1-2 ou 2-3 (contingências mais severas) produzem valores de severidade de 1.7804

pu e 2.0105 pu, respectivamente. Contudo, apesar da rede ser inadequada é possível quantificar o valor dessa inadequação.

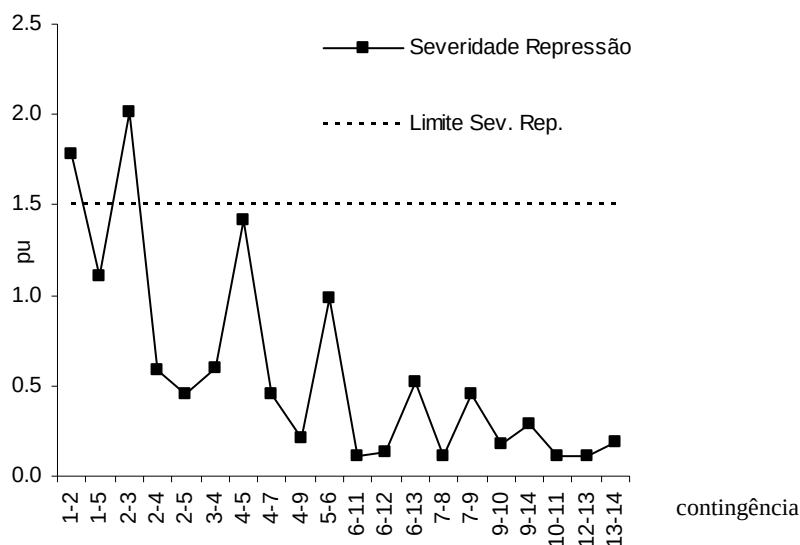


Figura 5.8 – Severidade de Repressão Global para cada contingência simulada, pu

5.4.2 Sugestões de reforço

Considerando a metodologia directa e que a rede seria adequada se respondesse a uma severidade de repressão de 1.5 pu (Figura 5.8), as situações de contingência a analisar corresponderiam à saída de serviço dos ramos 1-2 e 2-3. Portanto, a secção anterior fornece os resultados para todos os índices por contingência estudada permitindo que se conclua se a rede é ou não adequada e o seu nível de inadequação. Como se identificou, a estratégia a seguir corresponde a diminuir a severidade de repressão, pelo que se procura em cada contingência determinar as diminuições da severidade de repressão (DR). Por se tratar do modelo DC as DR são obtidas pela expressão (4.3) conforme Capítulo 4. Considera-se para o início da análise, a contingência correspondente à maior severidade de repressão: saída de serviço do ramo 2-3.

Analisando em pormenor a contingência do ramo 2-3 (Tabela 5.13) pode verificar-se que os barramentos que mais contribuem para a severidade global são o 1 e o 3. O caso dos barramentos 1 e 2 constitui uma nova situação de repressão. O caso do barramento 3 representa um acréscimo na repressão existente. Pode também concluir-se que a contingência

do ramo 2-3 não contribui para o aumento da severidade individual de repressão do barramento 14.

Tabela 5.13 – contingência do ramo 2-3

Contingência Ramo 2-3 (contingência 3)				
Severidade de Repressão			Ramos congest.	V. dual λ
Nova	Aumenta	Sem alter.		
Barra 1			R 2-4	2.5642
			R 5-6	0.3312
Barra 2			R 2-4	2.1778
			R 5-6	0.2813
Barra 3			R 3-4	1.0000
Barra 14			R 9-14	1.0000
			R 13-14	1.0000
			Severidade Global Rep (pu)	2.0105

A partir dos resultados do problema de otimização podem ser obtidos os intervalos (onde os valores duais da Tabela 5.13 são válidos) para as restrições dos ramos, e em consequência, as diminuições de repressão (Tabela 5.14):

Tabela 5.14 – contingência do ramo 2-3, intervalos e DR, pu

Barra	Ramo	$P_{ik \max}$	$P_{ik R}$	DR
1	R 2-4	0.6400	0.7800	0.3590
1	R 5-6	0.5000	0.5123	0.0041
2	R 2-4	0.6400	0.7600	0.2613
2	R 5-6	0.5000	0.5104	0.0029
3	R 3-4	0.4800	0.9915	0.5115
14	R 9-14	0.1400	0.1475	0.0075
14	R 13-14	0.0760	0.0835	0.0075

onde $P_{ik \max}$ e $P_{ik R}$ correspondem respectivamente ao valor inicial de limite do ramo (caso base) e ao valor final de limite do ramo (valor para o qual a variável dual se mantém válida sem alteração da base do problema)

A escolha natural recairá sobre o ramo 2-4 (limite inicial de 0.64 pu) já que a opção pelo seu reforço no maior valor (em 0.78 pu) provocará uma diminuição de repressão (a maior) de pelo menos 0.6203 pu (barramentos 1 e 2).

As Figuras 5.9 a) e 5.9b) ilustram as distribuições de possibilidade rectangulares antes e depois da saída de serviço do ramo 2-3 (condições do caso base) para os barramentos 1 e 2. A Figura 5.10 representa a mesma informação para o barramento 3 que para o caso base apresentava repressão (P_3').

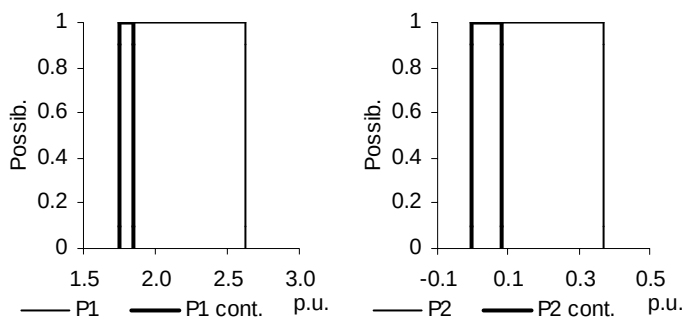


Figura 5.9 – Distribuições rectangulares para os barramentos 1 e 2 antes (P_i) e depois da contingência (P_i cont.) do ramo 2-3

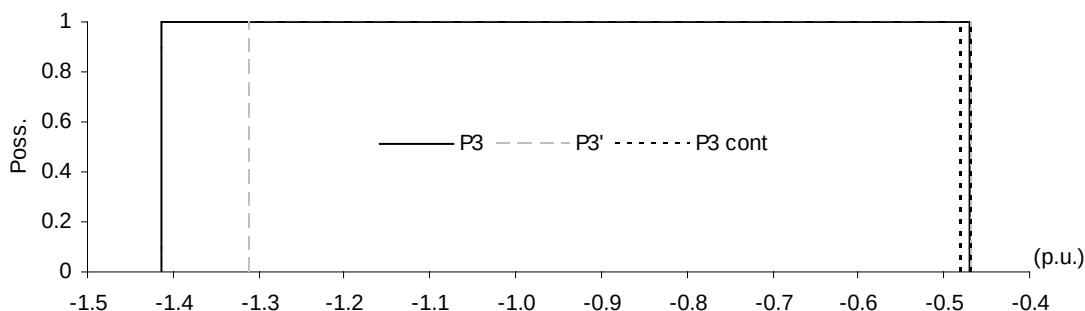


Figura 5.10 – Distribuição rectangular para o barramento 3 para a potência activa injectada, especificada (P_3), com limite à capacidade de transporte (P_3') e com a contingência do ramo 2-3 (P_3 cont.)

Embora não seja essencial (metodologia directa) o cálculo de contingências com repressão inferior ao limite definido (1.5 pu), identificam-se aquelas onde o reforço (ramo 2-4 em 0.78 pu) escolhido está activo. As situações de contingência identificadas nestas condições são: contingência 2 (ramo 1-5); contingência 5 (ramo 2-5); contingência 7 (ramo 4-5).

Nas Tabelas 5.15 a 5.17 estão representadas as contingências onde o ramo 2-4 surge congestionado.

Tabela 5.15 – contingência do ramo 1-5

Contingência Ramo 1-5 (contingência 2)					
Severidade de Repressão			Ramos congest.	V. dual λ	Sev. Individ. Rep. (pu)
Nova	Aumenta	Sem alter.			
Barra 1			R 1-2	1.0000	0.8280
Barra 2			R 2-3	1.0000	0.0535
			R 2-4	1.0000	
			R 2-5	1.0000	
Barra 3			R 2-3	1.7397	0.2118
14			R 9-14	1.0000	0.0075
			R 13-14	1.0000	
Severidade Global Rep (pu)					1.1008

Tabela 5.16 – contingência do ramo 2-5, pu

Contingência Ramo 2-5 (contingência 5)					
Severidade de Repressão			Ramos congest.	V. dual λ	Sev. Individ. Rep. (pu)
Nova	Aumenta	Sem alter.			
Barra 1			R 2-3	1.1619	0.3096
			R 2-4	2.0942	
Barra 3			R 2-3	1.8291	0.1342
Barra 14			R 9-14	1.0000	0.0075
			R 13-14	1.0000	
Severidade Global Rep (pu)					0.4512

Tabela 5.17 – contingência do ramo 4-5, pu

Contingência Ramo 4-5 (contingência 7)					
Severidade de Repressão			Ramos Rep. (pu)	V. dual λ	Sev. Individ. Rep. (pu)
Nova	Aumenta	Sem alter.			
Barra 1			R 2-4	3.2411	0.6507
			R 5-6	0.2092	
			R 6-12	0.1032	
Barra 2			R 2-4	2.7546	0.1616
			R 5-6	0.2092	
			R 6-12	0.1032	
Barra 3			R 2-4	2.7546	0.3273
			R 6-11	3.0953	
Barra 4			R 2-4	3.1876	0.2369
Barra 9			R 5-6	1.4776	0.0284
			R 6-11	3.7751	
Barra 14			R 9-14	1.0000	0.0075
			R 13-14	1.0000	
Severidade Global Rep (pu)					1.4122

Estão salientados os barramentos cuja repressão é influenciada pelo ramo 2-4. É interessante verificar que repressões nos barramentos nem sempre são devidas a congestionamentos em ramos adjacentes (ex. a repressão barramento 9 na Tabela 5.17 é influenciada pelos congestionamentos nos ramos 5-6 e 6-11 quando o ramo 4-5 sai de serviço).

Na metodologia directa, apenas seria calculada a situação de contingência 2. Contudo, na Tabela 5.18 podem ler-se os valores da severidade de repressão (após reforço do ramo 2-4) para todas as situações de contingência (onde a restrição do ramo 2-4 apresentava valor dual). As cores apresentam os significados habituais.

Nas Figuras 5.11 e 5.12, P_i^* , P_i^{**} e P_i^{***} representam respectivamente a potência injectada para o caso base – segurança N (Tabela 5.3 – $P_{ik\max}$), potência injectada para a situação de contingência (de primeira ordem) verificada e potência injectada mantendo-se a situação de

contingência mas tendo sido reforçado um ramo específico. No caso que se estuda o reforço é efectuado sobre o ramo 2-4. Como se referiu, este ramo influencia as contingências 2 (barramento 2), 3 (barramento 1 e 2), 5 (barramento 1) e 7 (barramento 1, 2, 3 e 4) havendo lugar a diminuição da repressão comparativamente ao caso base de contingência (**). Por clareza de exposição, nas figuras as setas representam os limites para cada uma das distribuições de possibilidade rectangulares P_i^* , P_i^{**} e P_i^{***} . Em seguida apenas serão mostrados os resultados gráficos após reforço do ramo 2-4 para a situação de contingência 3 (metodologia directa). Os resultados para as restantes contingências (2, 5 e 7) podem ser consultados no Anexo B.

Tabela 5.18 – Severidade de repressão para o caso base e para as situações de contingência 2, 3, 5 e 7 (pu) após reforço de 2-4 em 0.78 pu

	Segurança N		Contingência 2		Contingência 3		Contingência 5		Contingência 7	
	Caso base		1-5		2-3		2-5		4-5	
Nó	0-	0+	0-	0+	0-	0+	0-	0+	0-	0+
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.8280	0.0000	0.4180	0.0000	0.0358	0.0000	0.3985
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0183	0.0000	0.0065	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.1030	0.0000	0.2118	0.0000	0.9330	0.0000	0.1342	0.0000	0.2944	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0284	0.0000
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000
	Sev. Rep.	0.1105	Sev. Rep.	1.0656	Sev. Rep.	1.3650	Sev. Rep.	0.1775	Sev. Rep.	0.7287

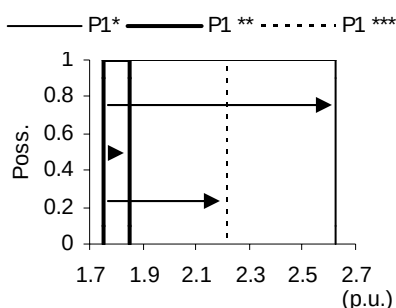


Figura 5.11 – Distribuição rectangular para a potência injectada no barramento 1 nas situações de: caso base (P_1^*); contingência 3 - ramo 2-3 - (P_1^{**}); reforço do ramo 2-4 em 0.78 pu na situação de contingência 3 (P_1^{***})

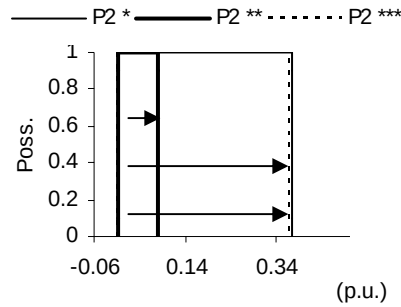


Figura 5.12 – Distribuição rectangular para a potência injectada no barramento 2 nas situações de: caso base (P2*); contingência 3 - ramo 2-3 (P2); reforço do ramo 2-4 em 0.78 pu na situação de contingência 3 (P2 ***)**

A severidade individual de repressão no barramento 1, por exemplo, para a contingência 3 (ramo 2-3) não desaparece completamente. De facto, quando se reforça 2-4 para 0.78 pu surge uma nova restrição activa (ramo 2-5) com valor dual de 1.6161. Assim se fosse pretendido continuar diminuir a repressão neste barramento e nesta contingência (ramo 2-3) teria de se realizar um estudo com vista ao reforço do ramo 2-5 (tal como para se fez para o ramo 2-4).

A severidade de repressão global (incluindo todas as situações de contingência cuja repressão é influenciada pelo reforço do ramo 2-4) vem agora:

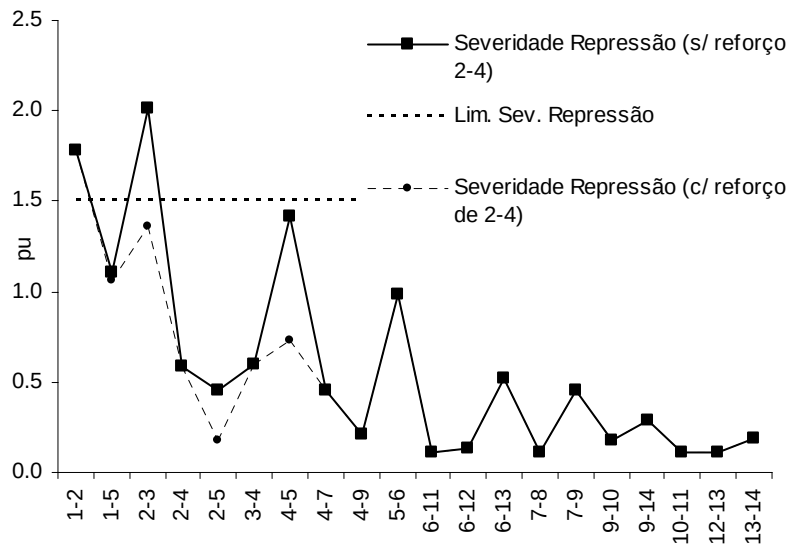


Figura 5.13 – Severidade de Repressão Global para cada contingência simulada – comparação após situação de reforço do ramo 2-4 em 0,78 pu

Com o reforço do ramo 2-4 o problema relativo à repressão provocada pela contingência do ramo 2-3 estaria solucionado. Contudo, sendo o critério de adequação de 1.5 pu, pode ainda identificar-se uma situação de contingência com repressão superior a esse limite (Figura 5.13). A nova situação de contingência a avaliar corresponde à saída de serviço do ramo 1-2. A Tabela 5.19 mostra os valores para os ramos com restrição activa nesta contingência, os barramentos cuja repressão é influenciada por esses ramos, os valores duais relativos às restrições, a severidade individual de repressão por barramento e a severidade global de repressão da rede.

Tabela 5.19 – Contingência do ramo 1-2 (contingência 1), pu

Contingência Ramo 1-2 (contingência 1)				
Severidade de Repressão			Ramos congest.	V. dual λ
Nova	Aumenta	Sem alter.		
1			R 1-5	1.0000
2			R 4-5	5.3746
			R 5-6	1.9382
			R 6-12	1.3062
			R 6-13	0.4203
3			R 4-5	5.4953
			R 6-12	0.6193
4			R 4-5	2.9483
			R 6-12	0.3323
		14	R 9-14	1.0000
			R 13-14	1.0000
Severidade Global Rep (pu)				1.7804

Com base nos resultados obtidos no problema de optimização em 5.4.1 podem obter-se novamente as diminuições de repressão devidas aos reforços dos ramos nos seus valores limite (intervalo de validade da variável dual).

Tabela 5.20 – contingência do ramo 2-3, intervalos e DR pu

Barra	Ramo	$P_{ik \max}$	$P_{ik R}$	DR
1	R 1-5	1.7800	1.8359	0.0559
2	R 4-5	0.9700	0.9800	0.0537
2	R 5-6	0.5000	0.5085	0.0165
2	R 6-12	0.0950	0.0973	0.0030
2	R 6-13	0.2000	0.2049	0.0021
3	R 4-5	0.9700	0.9900	0.1099
3	R 6-12	0.0950	0.0973	0.0014
4	R 4-5	0.9700	1.0600	0.2653
4	R 6-12	0.0950	0.0973	0.0008
14	R 9-14	0.1400	0.1475	0.0075
14	R 13-14	0.0760	0.0835	0.0075

Pela informação disponível (Tabela 5.20), as diminuições de repressão poderão ser ilustradas graficamente (Figura 5.14). Neste caso, a escolha óbvia para reforço é o ramo 4-5 que permite obter uma diminuição da repressão de pelo menos de 0.4289 pu se reforçado em 1.06 pu. O ramo 4-5 influencia a repressão dos barramentos 2, 3 e 4 (Tabela 5.19).

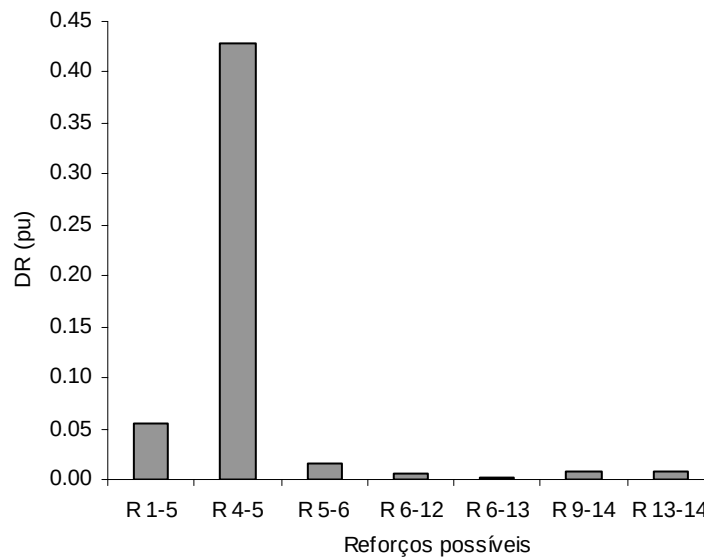


Figura 5.14 – valores mínimos das diminuições de repressão por reforço (ramo)

Apenas na situação de contingência 1 (saída de serviço do ramo 1-2), o ramo 4-5 apresenta valor dual diferente de zero. Em consequência, a severidade de repressão não irá sofrer alterações nas restantes contingências, ao contrário do que sucedeu anteriormente com o reforço do ramo 2-4.

Para o valor de reforço escolhido do ramo 4-5 (1.06 pu) ilustram-se as variações da severidade de repressão para a situação de repressão sem contingências (caso base), com contingência do ramo 1-2 (contingência 1) e com contingência do ramo 1-2 e reforço do ramo 4-5 (Figuras 5.15 e 5.16).

A Tabela 5.21 mostra a severidade global de repressão para a contingência 1 (ramo 1-2) antes e depois do reforço do ramo 4-5. A Figura 5.17 permite verificar que as acções de reforço consideradas para o caso de qualquer contingência de primeira ordem representarão uma severidade de repressão sempre abaixo do limite definido para consideração da rede adequada (1.5 pu).

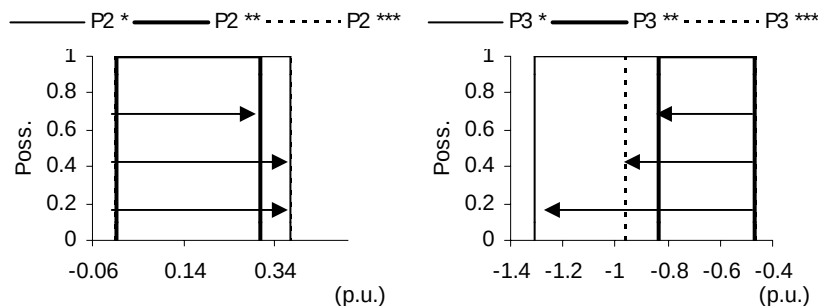


Figura 5.15 – distribuição rectangular para a potência injectada no barramentos 2 e 3 nas situações de: repressão base (P_i^*); contingência do ramo 1-2 ou contingência 1 (P_i^{**}); reforço do ramo 4-5 em 1.06 pu e na situação de contingência 1 (P_i^{***})

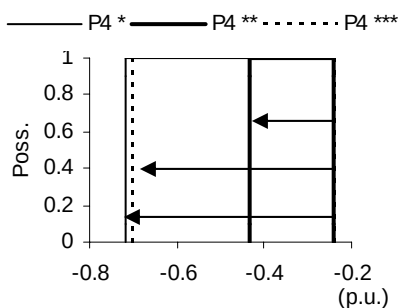


Figura 5.16 – distribuição rectangular para a potência injectada nos barramentos 4 nas situações de: repressão base (P_i^*); contingência do ramo 1-2 ou contingência 1 (P_i^{**}); reforço do ramo 4-5 em 1.06 pu e na situação de contingência 1 (P_i^{***})

Tabela 5.21 – Severidade de repressão para o caso base e para a situação de contingência 1 (pu) antes e após o reforço de 4-5 em 1.06 pu

	Segurança N		Contingência 1 (1-2)			
	Caso base		s/ reforço de 4-5		c/ reforço de 4-5	
Nó	0-	0+	0-	0+	0-	0+
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.8480	0.0000	0.8480
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0647	0.0000	0.0000
3	0.1030	0.0000	0.5777	0.0000	0.4528	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.2825	0.0000	0.0172	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000	0.0075	0.0000
	Sev. Rep.	0.1105	Sev. Rep.	1.7804	Sev. Rep.	1.3255

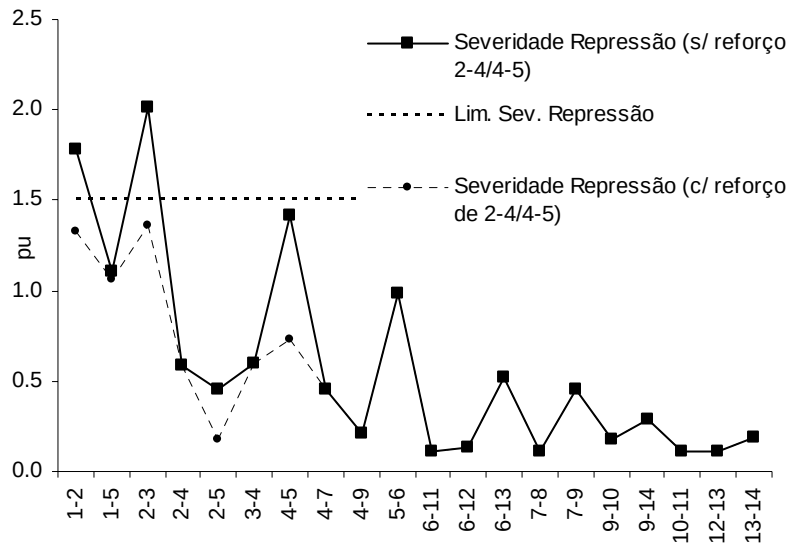


Figura 5.17 – Severidade de Repressão Global para cada contingência simulada – comparação após situação de reforço dos ramo 2-4 em 0.78 pu e 4-5 em 1.06 pu

O estudo realizado poderia ser levado a efeito também para o caso das repressões de potência reactiva injectada se o operador assim o entendesse.

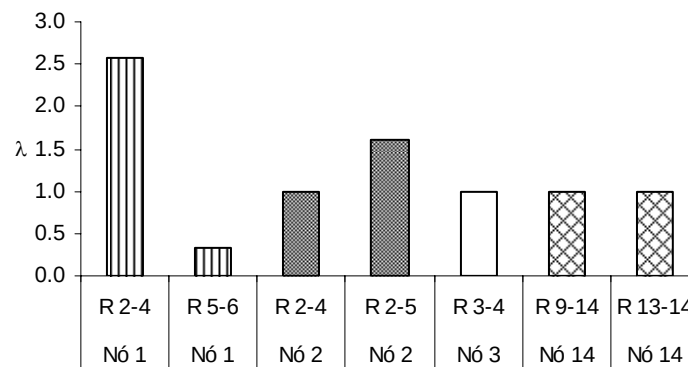


Figura 5.18 – Valores duais para os barramentos com repressão para a situação de contingência 2 (2-3) com o reforço do ramo 2-4 em 0.78 pu

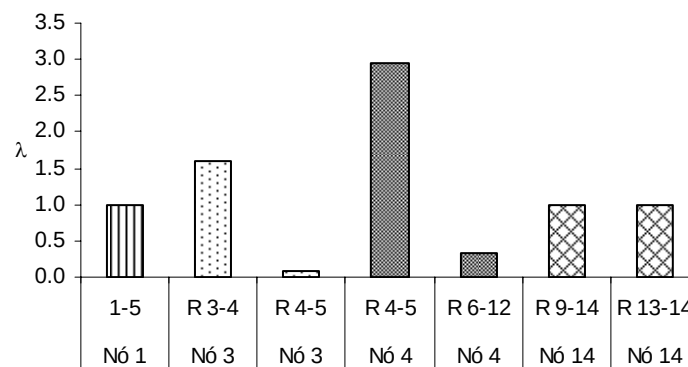


Figura 5.19 – Valores duais para os barramentos com repressão para a situação de contingência 1 (1-2) com o reforço do ramo 4-5 em 1.06 pu

Caso fosse desejado continuar a diminuir a repressão das contingências 1 (1-2) e 2 (2-3) teria de repetir-se o processo. Ou seja, para cada contingência e para os valores de reforço considerados deveriam ser identificados os ramos congestionados (valores duais diferentes de zero). A Figura 5.18 identifica as restrições activas para a contingência 2-3 para todos barramentos com severidade individual de repressão após o reforço do ramo 2-4 em 0.78 pu (Tabela 5.18). É possível verificar que existem ramos influenciando mais do que um barramento. O barramento com maior repressão é o 3 (0.9330 pu) pelo que o reforço de 3-4 seria um estudo a considerar. A Figura 5.19 ilustra o mesmo problema mas para a situação de contingência 1 (após reforço do ramo 4-5), cujos barramentos que apresentam repressão estão identificados na Tabela 5.18. Neste caso também é sugerida uma actuação ao nível dos barramentos 1 (0.8480 pu) e 3 (0.4528 pu) que configuram as maiores severidades individuais de repressão. Em ambos os casos (Figura 5.18 e Figura 5.19) os ramos reforçados (2-4 e 4-5) continuam a apresentar restrições activas. Significa este aspecto que os ramos não foram reforçados na sua capacidade máxima (situações correspondentes à identificação mais de um patamar).

5.5 CRITÉRIOS PROBABILÍSTICOS UTILIZANDO O CFPF: PEQUENO EXEMPLO

Na secção 5.3 foi referido como poderia o CFPF ser utilizado com métodos probabilísticos para obtenção da severidade esperada de repressão. Em seguida será apresentado um pequeno exemplo de carácter académico, apenas para esclarecer da potencial aplicação do CFPF neste tipo de estudos. Em estudos com redes de maior dimensão não será, para já, desenvolvida a aplicação do CFPF pelos motivos indicados na secção referida.

Considere-se a rede de 3 barramentos da Figura 5.20 e respectivos dados onde a produção e a carga são modelizadas por números difusos rectangulares. A probabilidade de saída de serviço por avaria dos ramos é de 0.01. Os limites técnicos dos ramos são para o ramo 1-2 de 10 MVA e para os restantes de 30 MVA. Foi utilizada uma potência de base de 100 MVA e o modelo completo (CFPF AC). Embora pudesse ser também calculada a repressão global esperada, considerou-se que o indicador desejado seria a severidade global esperada de repressão.

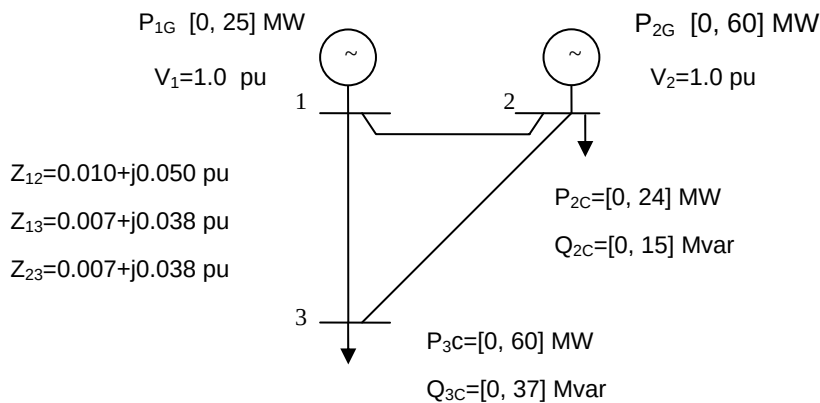


Figura 5.20 – Rede de 3 barramentos

Dado que se trata da avaliação da rede de transporte, apenas são consideradas avarias nos ramos. O número de estados a considerar é de apenas oito. Assim, para este pequeno sistema não se torna necessária a realização de sorteios do tipo Monte Carlo com vista à obtenção dos estados ou o cálculo de qualquer amostra (N).

De (5.2) pode especificar-se o número de estados em que o sistema poderá residir:

$$X' = [x'_1 \ x'_2 \ x'_3 \ x'_4 \ x'_5 \ x'_6 \ x'_7 \ x'_8] \quad (5.9)$$

Para cada estado é calculada a respectiva probabilidade de ocorrência assim como a severidade de repressão. Como são considerados todos os estados, a severidade esperada de repressão é obtida a partir de (5.6). Um ponto interessante é que além deste indicador da rede relativo aos pedidos de procura, pode-se também obter uma estimativa local para os barramentos. A esta estimativa poderemos chamar *severidade individual esperada de repressão* (neste caso poderia igualmente ser obtida a repressão esperada individual). Os resultados obtidos para cada estado x' e para o conjunto dos estados X' estão disponíveis na Tabela 5.22. A severidade global esperada de repressão é de cerca de 32 MW. A Figura 5.21 ilustra o andamento da severidade global/individual para cada estado x' simulado. As zonas A, B, C e D correspondem, respectivamente a segurança N, N-1, N-2 e N-3.

Tabela 5.22 – Severidade de repressão esperada para a rede de 3 barramentos, (pu)

Estado (x')	Ramo(s) fora de serviço	Sev. Global Rep.	Probab. (x')	Sever. Esperada			
				Global	Indiv. b1	Indiv. b2	Indiv. b3
1	----	0.3087	0.970299	0.2995	0.0000	0.2707	0.0287
2	1-2	0.3511	0.009801	0.0034	0.0000	0.0029	0.0005
3	1-3	0.8946	0.009801	0.0088	0.0015	0.0043	0.0029
4	2-3	0.9445	0.009801	0.0093	0.0000	0.0063	0.0029
5	1-2, 1-3	1.0907	0.000099	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000
6	1-2, 2-3	1.1904	0.000099	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000
7	1-3, 2-3	1.4939	0.000099	0.0001	0.0000	0.0001	0.0001
8	1-2, 1-3, 2-3	1.6900	0.000001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Totais (X')			1.000000	0.3213	0.0015	0.2845	0.0353

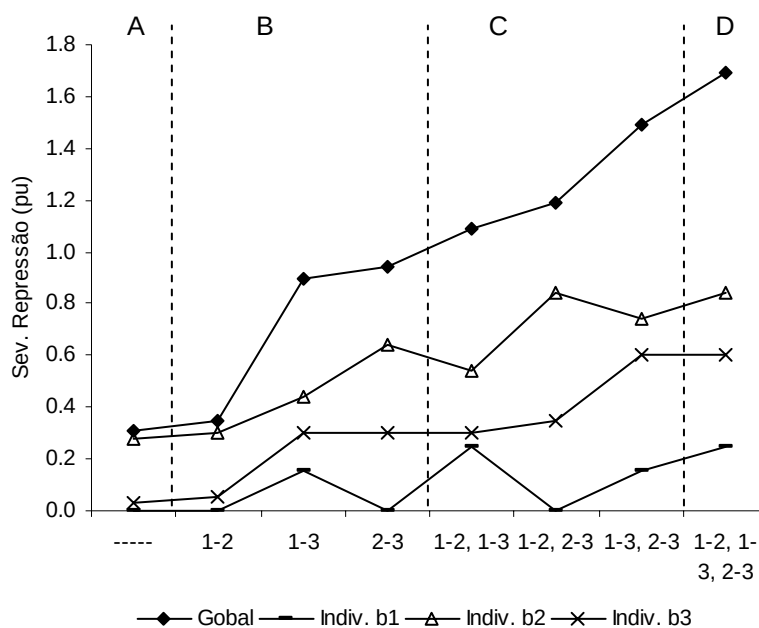


Figura 5.21 – Evolução da severidade global/individual de repressão para cada estado x' simulado

A informação da Tabela 5.22 pode ser também ilustrada sob a forma gráfica (Figura 5.22). No caso académico que se estuda, a maior fatia da severidade global de repressão esperada é devida sobretudo à repressão no barramento 2. O barramento 3 e o barramento 1 (em especial) têm um contributo pequeno sobre a severidade global esperada. Este aspecto poderá também representar um indicador de interesse em situações onde se pretenda conhecer os pontos (barramentos) mais fracos (perspectiva de adequação) da rede.

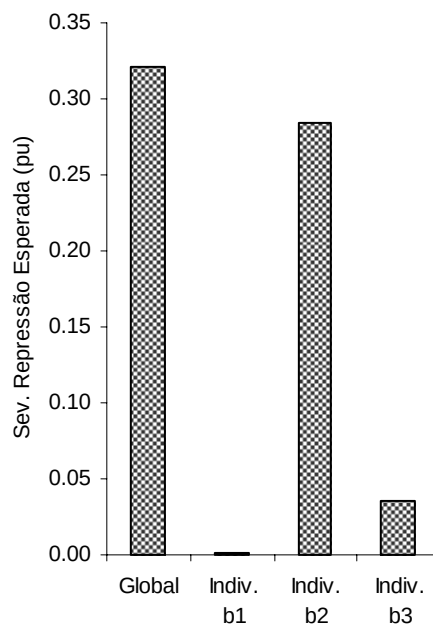


Figura 5.22 – Severidade global/individual de repressão esperada

O resultado da aplicação do CPFF mostrado neste pequeno exemplo permite obter a severidade global esperada de repressão. Os estados dos componentes da rede consideram a probabilidade de saída de serviço por avaria e a modelização dos pedidos de transporte (através de carga e produções nos barramentos) é realizada com a ajuda de números difusos.

5.6 CONCLUSÕES

Neste capítulo mostrou-se como pode o CFPPF ser utilizado na análise de segurança do tipo (N-1) e do tipo probabilístico.

Relativamente às versões clássicas para critérios determinísticos e probabilísticos, a metodologia proposta, integrada em análise de segurança, permite avaliar adequação da rede de transporte de forma separada da produção. Essa integração conduz à aplicação do conceito de repressão em análise de segurança.

Na integração do CFPPF em análise de segurança (N-1) o CFPPF é utilizado para avaliar a adequação de cada situação de contingência simulada. O resultado permite identificar quais as contingências mais severas para o sistema. Neste ponto foi exemplificado como as metodologias definidas no Capítulo 4 para reforço da rede podem ser facilmente incorporadas na análise de segurança N-1.

Nos modelos clássicos, o estado dos componentes do sistema composto é normalmente modelizado com probabilidades e as cargas são modelizadas por números determinísticos, distribuições de probabilidade ou distribuições de possibilidade. A integração do CFPPF em estudos probabilísticos considera modelização probabilística de componentes (apenas da rede de transporte) e a modelização possibilística dos pedidos de transporte, considerados independentes. A agregação de todos os estados sorteados permite estimar o valor esperado que no caso do CFPPF é a repressão global esperada ou a severidade global esperada de repressão. Os resultados permitem obter a adequação esperada para rede. Podem também ser obtidos indicadores locais para os barramentos, a repressão individual esperada e a severidade individual esperada de repressão. A integração do CFPPF em processos probabilísticos incluindo técnicas de simulação como o Método de Monte Carlo conduzirá nesta altura a tempos de simulação elevados uma vez que os tempos envolvidos no CFPPF são consideráveis. Estes são aspectos para desenvolvimento futuro.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

A necessidade de considerar incerteza do tipo não probabilístico no problema dos tráfegos de potência levou ao desenvolvimento do FPF. Com as modificações no sector eléctrico, como a introdução da Directiva 2003/54/EC onde o operador da rede terá de satisfazer “pedidos razoáveis de transporte de electricidade” é suscitada uma reflexão sobre o FPF que leva à análise da rede de transporte de forma exclusiva, fora do paradigma clássico de avaliação do sistema composto. Com esta finalidade são propostas metodologias (SFPP/CFPP) para os modelos de tráfego de potência.

Essas metodologias permitem o cálculo da adequação da rede de transporte em ambiente de mercado sendo os “pedidos razoáveis de transporte de electricidade” modelizados com recurso a distribuições de possibilidade. Como se mostrou tratam-se de metodologias simétricas onde todos os barramentos são tratados da mesma forma no sentido de terem definida a sua própria distribuição de possibilidade (situação que não exige a definição de um barramento de compensação como sucede com as formulações clássicas). Em consequência, os resultados serão também simétricos no que se refere aos barramentos. Por outro lado, não fazem recurso a linearizações e é irrelevante a escolha do barramento de referência, podendo optar-se por qualquer barramento PV ou mesmo PQ.

A primeira formulação simétrica (SFPP) permite a obtenção dos tráfegos de potência de referência para a rede. A integração de limites técnicos (restrições dos ramos) no problema (CFPP) constitui um aspecto fundamental na formulação proposta e permite que se avalie o efeito dos congestionamentos dos ramos nos pedidos de transporte de electricidade. Como consequência natural dos congestionamentos são obtidas as repressões. Com a finalidade de quantificar essas repressões são definidos índices de adequação. Um ponto importante no cálculo de repressões é que além de repressões de carga podem ser também obtidas repressões da produção. Este aspecto foi verificado nos estudos realizados sobre as redes de teste da IEEE. Assim, além das repressões de carga, « que apresentam custos para o mercado eléctrico

podem também ser identificadas repressões na produção que condicionam a concorrência entre produtores.

Com a finalidade de melhorar a adequação da rede de transporte foram também desenvolvidas metodologias para identificar sugestões de reforço baseadas na leitura dos valores duais, resultado natural do problema de optimização do CFPPF. Foi definida uma metodologia para o modelo DC (linear) e outra para o modelo completo (não linear). Ambas as metodologias permitem escolher o reforço baseadas na diminuição da repressão que o mesmo provoca localmente sobre os barramentos e globalmente sobre a rede. A diminuição da repressão conseguida por esta forma permite uma maior competitividade do mercado eléctrico podendo as metodologias ser integradas em processos de planeamento.

O CFPPF foi também integrado na análise de segurança considerando critérios determinísticos como o conhecido critério (N-1). Avaliou-se desta forma a contribuição da rede de transporte na segurança de abastecimento, uma vez que em caso de contingência, os índices de adequação a calcular são os mesmos que anteriormente. Outro aspecto a realçar é que nas formulações clássicas pode ser realizado recurso a um redespacho para evitar o corte de carga. O CFPPF inclui já todos os redespachos possíveis já que a informação de produção está completamente definida (modelizada de forma difusa) em cada barramento.

Em função do exposto pode-se referir que as metodologias desenvolvidas podem ser utilizadas por operadores da rede para auxiliar o processo de planeamento. Neste caso poderão avaliar as repressões de carga assim como as repressões de produção, já que ambas as situações condicionam o funcionamento do mercado eléctrico. A consequência da avaliação é a quantificação da adequação da rede. Dado que o mercado eléctrico se concretiza internacionalmente (por exemplo, MIBEL), poderá esta avaliação ser direccionada ao estudo de redes, no que se refere ao aumento da capacidade técnica de trocas internacionais [UCTE, 2006; ERSE, 2007; REN, 2008]. Também os reguladores poderão utilizar as metodologias para a definição de níveis de adequação da rede de transporte. Ao longo do tempo será necessário realizar o controlo da adequação e também neste caso o uso do SFPPF/CFPPF poderá ser adequado para que reguladores possam desempenhar esta tarefa.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Integração da metodologia proposta em estudos de fiabilidade

A realização de um estudo de fiabilidade tem por objectivo a determinação dos índices de fiabilidade de forma a caracterizar o comportamento do sistema (que apresenta uma dada configuração) que depende do comportamento não ideal dos seus componentes. Se for pretendida a aplicação da metodologia proposta a estudos de fiabilidade a incerteza a considerar será do tipo probabilístico para os componentes da rede de transporte e do tipo difuso para as potências de carga. O estudo realizado no Capítulo 5, de índole teórica, não considerou sorteio de estados. De facto, os tempos de simulação associados ao CFPF tornam difícil a aplicação desta metodologia integrada em estudos de fiabilidade considerando o Método de Monte Carlo. Neste caso, o sorteio dos estados deveria ser realizado apenas para os componentes da rede de transporte não devendo ser considerados os componentes do sistema produção como habitualmente se realiza na avaliação clássica da fiabilidade (sistema composto). Este é um ponto que deve ser considerado para desenvolvimento futuro em especial, depois de serem tratados os aspectos computacionais.

Aspectos Computacionais

Um aspecto que merece atenção prende-se com questões operacionais nomeadamente no que se refere aos tempos de simulação necessários. De facto, na formulação proposta é requerida a resolução de um número considerável de problemas de optimização (dois por cada variável e por cada corte de nível α). Este facto é aceitável porque não se trata de um problema *on-line* e pela importância da informação conseguida, nomeadamente os índices de adequação. No entanto é desejável o desenvolvimento de técnicas para a minimização do esforço computacional necessário, por exemplo técnicas de processamento paralelo.

Questões económicas

No Capítulo 4 foram definidas metodologias para quantificar o reforço de ramos e seu impacto na adequação da rede. Contudo, o reforço de um ramo envolve além de questões técnicas, questões económicas. Foi dada atenção à questão mais complexa, o reforço do ramo e seu impacto na adequação da rede. Assim, um ponto que merece atenção é também o aspecto económico. Neste caso poderia ser definido um problema de optimização que conduzissem ao reforço do ramo, considerando o aspecto económico de forma a satisfazer uma dada adequação local (barramento) ou global (rede). Cada ramo tem um custo fixo mais um

custo variável que depende do valor do reforço. O reforço apresenta um determinado efeito sobre a repressão (de produção ou de carga). O objectivo seria assim encontrar o grau de reforço a fazer em cada ramo para respeitar o limite de repressão e minimizar o custo.

Integração em processos de planeamento

Também no Capítulo 4 foram definidas estratégias de reforço com vista à diminuição da severidade de repressão que podem levar ao reforço de vários ramos de forma sucessiva. Ora este tipo de acções pode ser considerado num plano de expansão em que são especificadas as alturas (datas) em que esses reforços acontecem. Ou seja, para uma dada de caracterização de carga/produção do sistema que já integra incerteza (neste caso difusa) podem ser definidos planos de expansão com as acções de reforço devidamente quantificadas no que se refere a aspectos de adequação, aspectos económicos (custos dos reforços a considerar incluindo encargos de manutenção e exploração) e eventualmente (dado que os ramos já existem) aspectos ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agreira C I F, Ferreira C M M, Pinto J A D, Barbosa F M, “Estudo da influência dos índices de severidade na segurança de um Sistema Eléctrico de Energia”, Conferencia Hispano-Lusa De Ingeniería Eléctrica, 2007

Allan R N, Al-Shakarchi M R G, “Linear dependence between nodal powers in probabilistic AC load flow”, Proc IEE 124, 1977

Allan R N, Al-Shakarchi M R G, “Probabilistic Ac Load Flow”, IEEE Transactions on PAS, vol. 123, n.º 6, June 1976

Allan R N, Billinton R, “Probabilistic assessment of power systems”, Proceedings of the IEEE, Vol. 88, Issue 2, pp 140 – 162, February 2000

Allan R N, Borkowska B, Grigg C H, “Probabilistic analysis of power flows”, Proc IEE 121 vol.12, pp. 1551–1555, 1974

Allan R N, Silva A M L, “Probabilistic load flow using multilinearizations,” IEE. Proceedings, pt. C, vol. 130, no. 4, pp. 165–171, July 1983

Allan R N, Silva A M L, Burchett R C, “Evaluation methods and accuracy in probabilistic load flow solutions”, IEEE Trans. PAS, vol. 100, May 1981

Almeida S, Pestana R, Barbosa F M, “Definição e Análise de Contingências Severas na Rede Eléctrica Portuguesa”, Conferencia Hispano-Lusa De Ingeniería Eléctrica, 2005

Bansal, R C, “Bibliography on the fuzzy set theory applications in power systems (1994-2001)”, Power Systems, IEEE Transactions on, Volume 18, Issue 4, pp 1291 – 1299, , Nov. 2003

Beshir M J, Cheng T C, Farag A S A, “Comparison of two bulk power adequacy assessment programs: TRELSS and COMREL”, IEEE – Proceedings - Transmission and Distribution Conference, pp 431-437, September 1996

Bertsekas D P, “Nonlinear Programming: 2nd Edition”, Athena Scientific, 1999

Bijwe P R , Hanmandlu M, Pande V N, “Fuzzy power flow solutions with reactive limits and multiple uncertainties”, Electric Power Systems Research, vol. 76, Issues 1-3, September 2005

Billinton R, “Bibliography on the Application of Probability Methods In Power System Reliability Evaluation”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume PAS-91, Issue 2, pp 649 – 660, March 1972

Billinton R, “Power System Reliability Evaluation”, Gordon and Breach, Science Publishers, New York, 1970

Billinton R, Allan, R, “Reliability Assessment of large electric Power Systems”, Pitman Publications, Kluwer Academic Publishers, 1988

Billinton R, Mo R, “Deterministic/probabilistic contingency evaluation in composite generation and transmission systems”, Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE 10-10, Vol. 2, pp 2232 - 2237, June 2004

Billinton R, Mo R "Impact of equipment availability on composite system reliability," in Proc. 2003 IEEE/CCECE Canadian Electrical and Computer Engineering Conf., vol. 1, pp 607-612, 2003

Billinton R, Sheblé G, “Reliability and Risk Assessment in the New Electric Power Utility Market Environment, PMAPS | RIMAPS Tutorial, September 2000

Billinton R, Wenyuan L, “Composite system reliability assessment using a Monte Carlo approach”, Third International Conference on Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems, 1991 (a)

Billinton R, Wenyan L, “Hybrid approach for reliability evaluation of composite generation and transmission systems using Monte-Carlo simulation and enumeration technique”, IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 138, No 3 , pp 233 – 241, May 1991 (b)

Billinton, R, Allan, R, “Reliability Evaluation of Power Systems”, second edition, Plenum Press, 1996

Billinton R, Li W, “Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, Plenum Press, 1994

Billinton R, Satish J, Goel L, "Hierarchical reliability evaluation in an electric power system,” in Proc. 1993 IEEE/NUTA Athens Joint Power Tech. Conf., Vol. 2, pp 616-621, 1993

Borkowska B, “Probabilistic Load Flow”, IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-93, pp. 752-759, 1974

Braga A S D, Saraiva J T, “A Multiyear Dynamic Approach for Transmission Expansion Planning and Long-Term Marginal Costs Computation Power Systems”, IEEE Transactions on, Vol. 20, Issue 3, pp 1631 – 1639, August 2005

Caglar R, Ozdemir A, “Composite electric power system adequacy evaluation via transmission losses based contingency selection algorithm”, Electric Power Engineering, 1999 PowerTech Budapest 99, International Conference on, pp 84, 1999

Carola P, Madeira B, Reis F S, Pinto M, “Capacidade de trocas entre duas áreas: Aplicação à rede Ibérica”, Proceedings of AEDIE, 2005

Carpentier J, “Contribution a l’Étude de Dispatching Économique”, Bulletin Society Française Electriciens, Vol. 3, pp 431-447, August 1962

Carpentier J, “Optimal power flows (survey),” Electric Power & Energy Systems, vol. 1, no. 1, pp 142-154, 1979

Dimitrovski A, Tomsovic K, “Boundary Load Flow Solutions”, IEEE Trans. Power Systems, vol. 19, no.1, pp 348 – 355, February 2004 (a)

Dimitrovski A, Tomsovic K, “Risk assessment using boundary load flow solutions”, Engineering intelligent systems for electrical engineering and communications, vol. 13, no2, pp. 155-161, June 2005 (a)

Dimitrovski A, Tomsovic K, “Slack bus treatment in load flow solutions with uncertain nodal powers”, in Proceedings of 2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Iowa, USA, September 2004 (b)

Dimitrovski A, Tomsovic K, “Uncertainty in Load Flow Modeling: Application of the Boundary Load Flow,” Automation of Electric Power Systems: Special Issue on Developments in Load Flow and Optimal Power Flow Techniques, Vol. 29, No. 16, pp. 6-15, August 2005 (b)

Dopazo J F, Klitin O A, Sasson A M, “Stochastic load flows”, IEEE Trans. Power Appar. Syst. PAS-94, Vol. PAS-94, n°2, 1975

Ejebe G C, Wollenberg B F, "Automatic Contingency Selection", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, pp. 97-109, Jan/Feb 1979

El-Hawary M (Ed.), Electric Power Applications of Fuzzy Systems, IEEE Press Series on Power Engineering, New York, 1998

El-Keib A A, Ma X, “Calculating Short-Run Marginal Costs of Active and Reactive Power Production”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp 559 – 565, May 1997

Eltra, “ Eltra’s Model Tools for System Analyses“, Eltra, April 2003

Entidade Reguladora do Sector Eléctrico, “Mercado Interno de Electricidade - abertura de mercado em Portugal Continental”, ERSE, 1998

Entidade Reguladora do Sector Eléctrico, “Caracterização do sector eléctrico - Portugal Continental 1999”, ERSE, 1999

EPRI, “Composite system reliability evaluation: Phase I – Scoping study”, Report EL-6503, October 1989

Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, “Manual de Procedimentos do Mecanismo de Gestão Conjunta da Interligação Portugal-Espanha”, ERSE 2007

Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, “Manual de Procedimentos do Gestor do Sistema,”, ERSE 2008

Fang R S, David A K, “Transmission congestion management in an electricity market”, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 14, Issue 3, pp 877 – 883, August 1999

Gal T G, Greenberg H J, “Advances in Sensitivity Analysis and Parametric Programming”, Springer Edition, 1997

Ganesan K, Moore E, Vetter W J, “On convergence of Newton's method for load flow problems”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 7, Issue 3, Pages 325 – 336, July 1972

Gil H A, Galiana F D, da Silva, E L “Nodal price control: a mechanism for transmission network cost allocation”, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol.1, Issue 1, pp 3 – 10, February 2006

Glimn A F, Stagg G W, “Automatic Calculation of Load Flows”, Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 76, Issue 3, pp 817-825, April 1957

Gouveia E M, “Avaliação do risco de perda de carga perante múltiplas incertezas integrando produção em regime especial”, artigo publicado nos proceedings das 2as Jornadas Politécnicas de Engenharia, Setúbal (ESTS), Portugal, Novembro de 2002

Gouveia E M, Matos M A, “Constrained Fuzzy Power Flow”, in Proceedings of IEEE PowerTech 2007, pp. 1314-1319, Lausanne, Switzerland, June 2007

Gouveia E M, Matos M A, “Evaluating Operational Risk in a Power System with a Large Amount of Wind power”, Electric Power Systems Research, DOI:10.1016/j.epsr.2008.10.006, 2008 (b)

Gouveia E M, Matos M A,” Operational reserve of a power system with a large amount of wind power”, Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2004 International Conference on, 12-16 Sept. 2004, pp 717- 722, September 2004

Gouveia E M, Matos M A,” Symmetric AC Fuzzy Power Flow Model”, European Journal of Operational Research, DOI: 10.1016/j.ejor.2007.12.044, 2008 (a)

Gouveia E, Matos M A, “Detailed Calculation of Fuzzy Power Flow”, Proceedings of the ORMES 2006, Coimbra, September 2006

Hajdu L P, Peschon J, Tinney W F, Piercy D S, “Optimum Load-Shedding Policy for Power Systems”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, Issue: 3, pp 784-795, March 1968

Hao J, Shi L, Xu G, Xie Y, “Study on the Fuzzy AC Power Flow Model”, Proc. 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, R. China, pp 5092-5096, June 2004

Hill M., Marques M.” Investigação Operacional, Vol.I -Programação Linear”, Edições Sílabo, 1999

Hu Z, Wang X, “A probabilistic load flow method considering branch outages”, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 21, Issue 2, pp 507 – 514, May 2006

Ivanova E Y, Voropai N I, “Generation Planning In An Electricity Market: Decision Making Procedures”, Proceedings of MedPower'04, Lemesos, Cyprus, November 14-17, 2004

Jacobs J M, “Approximating expected marginal production cost with capacity commitment requirements”, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 10, Issue 3, pp 1511 – 1517, August 1995

- Jeter M W, “Mathematical Programming: An Introduction to Optimization”, CRC Press, 1986
- Kafka R J, “OPF for economic control of transmission congestion”, Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE, Volume 2, pp 1062 – 1063, 1999
- Klump R, Overbye T J, “Techniques for improving power flow convergence”, Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, Volume 1, Issue , 2000 pp 598 - 603, 2000
- Kubokawa J, Okubo Y, Sasaki H, Yokoyama R, “A study of an interactive fuzzy multi-objective optimal power flow“, Electrical Engineering in Japan, Vol. 130, Issue 1, pp 59 – 67, 1999
- Leite da Silva A M, Allan R.N., Soares S. M, Arienti V. L., "Probabilistic Load Flow Considering Network Outages," IEE Proc.-C Gen. Trans. Distri., Vol. 132, pp. 139-145, 1985
- Leite da Silva A M, Arienti V L, "Probabilistic load flow by a multilinear simulation algorithm," IEE Proc.-C Gen. Trans. Distri., Vol. 137, pp. 276-282, July 1990
- Leite da Silva A M, Arienti V L, Allan R N, “Probabilistic Load Flow Considering Dependence Between Input Nodal Powers”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, Issue 6, pp 1524-1530, June 1984
- Leite da Silva A M, Arienti V L, Allan, R N,” Probabilistic Techniques in load Flow Analysis – a practical application”, Proc. 1st Int. Symp. on Probabilistic Methods Applied do Power Systems, Toronto, Canadá, pp 643-651, July 1986
- Leite da Silva A M, Ribeiro S M P, Arienti V L, Allan R N, Do Coutto Filho M B, “Probabilistic load flow techniques applied to power system expansion planning”, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 5, Issue 4, pp 1047 – 1053, November 1990
- Madrigal M, Ponnambalam K, Quintana V H, “Probabilistic optimal power flow”, Electrical and Computer Engineering, 1998 IEEE Canadian Conference on, 24-28, Vol. 1, pp. 385-388, May 1998

Mangueira H D, Saavedra O R, Pessanha J E O, “Impact Wind Generation on the Dispatch of the System: a Fuzzy Approach”, *Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 30, pp 67-72, October 2007

Matos M A, Gouveia E M, “Fuzzy Power Flow Revisited“, *Power Systems, IEEE Transactions on*, Volume 23, Issue 1, Page(s):213 – 218, February 2008

Matos M A, Gouveia E M, The Fuzzy Power Flow Revisited, in *Proceedings of IEEE PowerTech 2005*, Saint Petersburg, June 2005

Matos M A, Ponce de Leão M T, “Electric Distribution Systems Planning with Fuzzy Loads”, *International Transactions in Operational Research*, Vol. 2, pp 287-296, 1995

Mello J C O, Pereira M V F, Leite Silva A M, “Evaluation of Reliability Worth in Composite Systems based on Pseudo-Sequential Monte Carlo Simulation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, pp 1318-1326, August 1994

Mikolinnas T A, Wollenberg B F; “An Advanced Contingency Selection Algorithm”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, Issue 2, pp: 608 – 617, February 1981

Milligan M R, “A Chronological Reliability Model to Assess Operating Reserve Allocation to Wind Power Plants”, presented at 2001 European Wind Energy Conference, Copenhagen, Denmark, June 2001 (b)

Milligan M R, “A Sliding Window Technique for Calculating the System LOLP Contributions of Wind Power Plants”, presented at the American Wind Energy Association Windpower 2001 Conference, Washington, June 2001 (a)

Miranda V, “A fuzzy perspective of power system reliability”, *Electric Power Applications of Fuzzy Systems*, chapter 9, Wiley-IEEE Press, 1998

Miranda V, “Fuzzy flows in gaz and electricity networks”, in Proceedings of the European Simulation Multiconference –SEM’91, Copenhagenm Denmark, Erik Mosekild ed. Tech. Univ.Denm., Lyngby, 1991

Miranda V, Matos M A, “Distribution System Planning with Fuzzy Models and Techniques”, Proceedings of CIRED 89, Brighton, pp 472 – 476, 1989 (a)

Miranda V, Matos M A, “A Holistic Approach in Multicriteria Decision Aid”, in Improving Decision Making in Organizations, A G Lockett Edt, Lecture Notes in Economical and Mathematical Sciences, Springer Verlag, Berlin 1989 (b)

Miranda V, Matos M A, Saraiva J T. "Análise de redes com um novo conceito: Fluxo de cargas impreciso". ENDIEL 89, Porto, Portugal, 1989

Miranda V, Matos M A, “Determinação de diagramas de carga imprecisos úteis ao planeamento da distribuição de energia eléctrica”, Investigação Operacional, Vol.7 nº 2, pp 25-30, 1988

Miranda V, Matos M A, Saraiva J T, “Fuzzy Flows in Linear Networks with Correction for Some Dependencies in Nodal Uncertainties”, Investigação Operacional, Vol.12, nº2, pp 185-196, December 1992

Miranda V, Matos M A, Saraiva J T. "Incertezas na Geração e Cargas Incorporadas em Estudos de Fluxo de Cargas". 1as Jornadas Hispano-Lusas de Ingenieria Electrica, Vigo, Espanha, Junho 1990 (a)

Miranda V, Matos M A, Saraiva J T, “Fuzzy Load Flow - New Algorithms Incorporating Uncertain Generation and Load Representation”, Proceedings of the 10th PSCC, London, 1990 (b)

Miranda V, Saraiva J T, “Fuzzy modeling of power system optimal load flow”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, no. 2, May 1992

- Mordecai A, “Nonlinear Programming: Analysis and Methods”. Dover Publishing, 2003
- Nash S G, Sofer A, “Linear and Nonlinear Programming “, New York: McGraw-Hill Companies, 1996
- Neimane V, Andersson G, “Distribution networks reinforcement planning: a dynamic multi-criteria approach”, Electric Power Engineering, 1999. PowerTech Budapest 99. International Conference on, pp 260, 1999
- Neyer A, Wu F F, Imhof K, “Object-oriented programming for flexible software: example of a load flow”, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 5, Issue: 3, pp 689-696, August 1990
- Niimura T, Niu Y, “Transmission congestion relief by economic load management”, Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, 25-25 July 2002, Vol. 3, pp 1645-1649, 2002
- Paiva, J P S, “Redes de Energia Eléctrica, uma análise sistemática, IST Press, Dezembro 2007
- Pajan P A, Paucar V L, “Fuzzy power flow: considerations and application to the planning and operation of a real power system”, Proceedings of PowerCon 2002, vol.1, October 2002
- Pereira M V F , Maceira M E P, Oliveira G C, Pinto L M V G, “Combining analytical models and Monte-Carlo techniques in probabilistic power system analysis”, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 7, Issue: 1, pp 265-272, February 1992
- Pereira M. V. F., Balu N. J., “Composite generation/transmission reliability evaluation”, Proceedings of the IEEE, Vol. 80, pp 470 - 491, April 1992
- Pollitt M, “Electricity Reform in Chile: Lessons for Developing Countries”, Journal of Network Industries 5 (3-4): 221-262, 2004

Ponce de Leão M T, Matos M A, "Fuzzy Modeling of Independent Producers for Multicriteria Electric Distribution Planning", Proceedings IEEE Stockholm Power Tech, Vol. Power Systems, pp 826-831, Stockholm, 1995

Ponce de Leão M T, Matos M A, "Distribution planning with fuzzy loads and independent generation", Electricity Distribution. Part 1: Contributions. CIRED. 14th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ. No. 438), Volume 6, 2-5 June 1997 pp 12/1 - 12/5 vol.6, 1997

Ponce de Leão M T, Matos M A, "Fuzzy models for producers from natural resources", Fuzzy Systems Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence, The 1998 IEEE International Conference on, Vol. 2, 4-9, pp 1044 – 1047, May 1998

Preston E G, "Reliability of Electric Generation with Transmission Constraints, dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, University of Texas at Austin, May 1997

Raïkar S, Ilic M, "Assessment of transmission congestion for major electricity markets in the US", Power Engineering Society Summer Meeting, 2001 IEEE, Vol. 2, pp 1152 – 1156, 2001

Raineri R, Rudnick H, "Restructuring Chilean Electric and Gas Industries: From monopolies to Competition". Annual North American Conference Sept 7-10, San Francisco, California pp 390-399, 1997

Rede Eléctrica Nacional, "Plano de Investimentos na Rede Nacional de Transporte – 2006-2011, Rede Eléctrica Nacional, Novembro de 2005 (a)

Rede Eléctrica Nacional, S.A., "Relatório de Sustentabilidade – 2004-2005", Rede Eléctrica Nacional 2005 (b)

Rede Eléctrica Nacional, S.A., Caracterização da Rede Nacional de Transporte para efeitos de Acesso à Rede em 31 De Dezembro de 2007, Março de 2008

Rios M, Bell K, Kirschen D, Allan R, “Computation of the Value of Security, Final Project Report”, Vol. I, October 1999

Saraiva J T, “Aplicação de Conjuntos Imprecisos na Modelização e Planeamento de Sistemas Eléctricos”, PhD Tesis, FEUP, 1992

Saraiva J T, Duarte F O, “Enhanced fuzzy power flow models integrating correlation between nodal injections”, Electrotechnical Conference, 1996 MELECON '96., 8th Mediterranean, Vol. 2, 13-16 pp 885 - 888, May 1996

Saraiva J T, Fonseca N, Matos M A, “Fuzzy Power Flow – An AC Model Addressing Correlated Data”, in: Proc PMAPS'04, Ames, Iowa, September 2004

Saraiva J T, Miranda V, “Evaluation of the performance of a fuzzy optimal power flow algorithm”, Electrotechnical Conference, 1994 Proceedings., 7th Mediterranean, Vol.3, Issue 12-14, pp 897 – 900, Apr 1994 (b)

Saraiva J T, Miranda V, “Impacts in Power System Modeling from Including Fuzzy Concepts in Models”, Athens Power Tech, 1993. APT 93. Proceedings. Joint International Power Conference, Vol. 1, Issue, 5-8, pp 417 – 422, September 1993

Saraiva J T, Miranda V, Matos M A, “Generation and Load Uncertainties Incorporated in Load Flow Studies, in: Proceedings of MELECON 91, Ljubljana, pp 1339-1342, May 1991

Saraiva J T, Miranda V, Pinto L M V G, “Generation/transmission power system reliability evaluation by Monte-Carlo simulation assuming a fuzzy load description”, IEEE Trans. Power Syst. 11, pp 690–695, 1995

Saraiva J T, Miranda V, Pinto L M V G, “Impact on some planning decisions from a fuzzy modeling of power systems”, Power Systems, IEEE Transactions on, Vol.9, Issue 2, pp 819 – 825, May 1994 (c)

Saraiva J T, Sousa A V, “New advances in integrating fuzzy data in Monte Carlo simulation to evaluate reliability indices of composite power systems”, Mediterranean Electro-technical Conference, MELECON 98 (9th), vol. 2, pp. 1084–1088, 1998

Saraiva T J, Miranda V, “Flexible power system reinforcement planning under uncertainty”, Electrotechnical Conference, 1994. Proceedings, 7th Mediterranean, Vol. 3, pp: 913-916, April 1994 (a)

Sarfi R J, Salama M M A, Chikhani A Y, “Applications of fuzzy sets theory in power systems planning and operation: a critical review to assist in implementation”, Electric Power Systems Research, Vol. 39, Number 2, pp 89-101, November 1996

Sayas F C, “Reliability Assessment of Distribution Networks Containing Embedded Wind Generation”, Ph.D dissertation, University of Manchester, March 1996

Schlumberger Y, Lebrevelec C, De Pasquale M, “Power Systems Security Analysis - New Approaches Used At EDF”, Panel Session on Reliability criteria for transmission system operation and design under restructuring, IEEE summer meeting July 21, Edmonton, Canada, July 1999

Srinivasan D, Liew A C, C S C, “Applications of fuzzy systems in power systems”, Electric Power Systems Research, Vol. 35, Number 1, pp 39-43, October 1995

Stott B, “Review of Load Flow Calculation Methods”, Proceedings of IEEE 62, pp 916-929, 1974

Stott B, Alsac O, “Decoupled Newton Load Flow”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume: PAS-91, Issue 5, pp 1955-1959, May 1972

Stott B, Alsac O, “Fast Decoupled Load Flow”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume: PAS-93, Issue 3, pp 859-869, May 1974

Subramanian D K, “Optimum Load Shedding Through Programming Techniques”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, Issue 1, pp 89-95, January 1971

Sun H, Yu D C, Xie Y, “Application of fuzzy set theory to power flow analysis with uncertain power injections”, Power Engineering Society Winter Meeting 2000 IEEE, vol.2, pp 1191-1196, January 2000

Tinney W F, Hart C E, “Power Flow Solutions by Newton’s method”, IEEE Transactions, Power Apparatus and Systems, Vol. 86, pp 1449, November, 1967

Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity, “Operation Handbook”, Appendix 4: Coordinated Operational Planning, A capacity assessment, UCTE, May 2006

Verbic G, Schellenberg A, Rosehart W, Canizares C A, “Probabilistic Optimal Power Flow Applications to Electricity Markets”, Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006, International Conference on, 11-15 June 2006, pp 1-6, June 2006

Wallach Y, Conrad V, “Parallel solutions of load flow problems, Electrical Engineering Journal, Volume 57, Number 6, pp 345-354, November 1976

Wang Z, Alvarado F L, “Interval arithmetic in power flow analysis”, IEEE Trans. Power Systems, vol.7, 1992

Ward J B, Hale H M, “Digital Solution of power flow problems”, Transactions AIEE, Vol. 75, Part III, pp 398-404, 1956

Wong K, Li A, “Solving the load-flow problem using genetic algorithm”, Evolutionary Computation 29 Nov.-1 Dec, 1995, IEEE International Conference on, Vol. 1, pp 103, December 1996

Wood A J, Wollenberg B F, “Power generation, operation, and control, chapter 11, John Wiley & Sons, New York, 1996

Xiaohong G, Liu H E, Papalexopoulos A D, “Application of a fuzzy set method in an optimal power flow”, Electric power systems research, Vol. 34, no1, pp 11-18, 1995

Zadeh L A, “Fuzzy Sets, Information and Control”, no. 8, pp 338-353, August 1965

Zadeh L A, "Fuzzy Sets as the Basis for a Theory of Possibility", Fuzzy Sets and Systems 1:3-28, 1978. (Reprinted in Fuzzy Sets and Systems 100 (Supplement): 9-34, 1999)

Zimmermann H J, “Fuzzy set, decision making and Expert Systems” Kluwer Nijhoff Publishing, 1985

Zimmermann H J, “Fuzzy set theory and its applications”, second ed., Kluwer Academic Publishers, 1991

APLICAÇÕES COMERCIAIS EM FIABILIDADE

Em seguida são descritas sucintamente algumas das aplicações internacionais conhecidas para cálculo de fiabilidade de sistemas eléctricos no âmbito do sistema composto. De referir que o modelo Zanzibar foi enunciado no Capítulo 2, não sendo tratado neste anexo. No entanto se forem pretendidos mais pormenores sobre o modelo poderão ser consultadas as referências [Carola et al, 2005; REN, 2005b].

Modelo MÉXICO – Este modelo utilizado pela EDF para estudos de planeamento de subsistemas de transporte em ambiente probabilístico. A metodologia modeliza potências de carga e indisponibilidade/disponibilidade de componentes através de conceitos probabilísticos. O processo de simulação utilizado é o Método de Monte Carlo (MMC) não sequencial sendo analisado um número elevado de estados do sistema que é função dos equipamentos disponíveis e do valor da carga. Para cada estado do sistema é realizado um despacho económico, formulado através de um modelo linear e integrando o modelo DC de fluxo de cargas. Os índices de fiabilidade que se podem obter fornecem indicação sobre o valor esperado da potência não fornecida e da probabilidade de corte de carga. É ainda possível avaliar o reforço na capacidade de transporte de linhas e transformadores e seu impacto nos índices referidos [Schlumberger, 1999].

Modelo METRIS – derivado do modelo México, introduz novas formas de modelização que permitem adaptar melhor a simulação à nova organização do sector eléctrico. O modelo avalia custos de funcionamento (considerando a disponibilidade dos grupos produtores e das linhas de transporte), fiabilidade das transacções (avalia a fiabilidade de cada troca de energia de acordo com as limitações da rede) e identifica pontos fracos (onde se aumentada a capacidade de transporte se terão melhorias significativas em custos de operação e na fiabilidade do transporte). O modelo permite modelizar sistemas interligados operados por entidades independentes sendo representados contratos de transferência de energia existentes ou a existir. Em consequência consegue-se conhecer o balanço de produção, carga e transferência para cada entidade. Mais ainda, cada estado do sistema sorteado é analisado para minimizar uma função objectivo que inclui custos de funcionamento e possibilidades de renegociação do

contrato. O modelo resolve um problema de despacho económico para um grande número de situações sorteadas aleatoriamente [Eltra, 2003].

Modelo TRELLS – Transmission RELiability Evaluation for Large Scale Systems Studies. O modelo TRELLS é utilizado nos EUA e tem por objectivo avaliar a fiabilidade do sistema composto. O modelo probabilístico consiste de uma técnica analítica que identifica as contingências que podem causar problemas ao sistema. Fornece dados para análise custo/benefício de reforços no sistema. Avalia o impacto de saídas forçadas durante falhas permanentes ou temporárias. O modelo estima o risco de perda de carga e identifica pontos fracos na rede [Beshir et al, 1996; Preston, 1997]

Modelo SYREL - O primeiro programa da EPRI de avaliação de fiabilidade foi o SYREL. O programa utilizava a técnica de enumeração de estados para avaliar a fiabilidade do sistema composto. Este programa foi mais tarde substituído pelo TRELSS que tem capacidade para simular maior número de barramentos [Preston, 1997].

Modelo COMREL – COMposite system RELiability analysis, foi desenvolvido no Canadá e é utilizado em aplicações industriais por algumas entidades na América do Norte. Modelo muito semelhante ao TRELLS, mas com muito menos capacidade em número de barramentos e produção de índices [Beshir et al, 1996].

Modelo CREAM – modelo para análise da fiabilidade do sistema composto desenvolvido para a EPRI. Este modelo é semelhante ao TRELSS mas utiliza o MMC para seleccionar (sortear) as configurações das linhas e dos geradores em vez dos métodos de enumeração. Como desvantagem apresenta a sua máxima capacidade para o cálculo de apenas 500 barramentos [Preston, 1997].

Modelo MECORE – modelo para avaliação da fiabilidade do sistema composto. O MECORE é uma ferramenta de simulação baseada na técnica de simulação não sequencial que foi desenvolvida no Canadá. O modelo é baseado na combinação da técnica de amostragem de

estados com técnicas de enumeração. O MMC é utilizado para simular os estados dos componentes do sistema e calcula os índices anuais para a ponta de carga do sistema. O programa tem capacidade para 1000 barramentos e 2000 ramos e pode ser utilizado para fornecer uma série de índices locais e de índices de sistema para o sistema composto. Os índices fornecidos pelo programa podem ser utilizados para auxiliar na comparação de diferentes alternativas de planeamento do ponto de vista da fiabilidade [Billinton, Wenyan, 1991].

Modelo SIVAELNET – modelo de simulação para propósito de planeamento do sistema incluindo centrais de produção, redes de transporte e ligações internacionais (AC e DC). Este é um modelo adaptado à liberalização dos mercados eléctricos e como aplicações permite: análise técnica e económica e análise de contingências nas redes de transporte, análise de consequências para o sistema e para a rede, da expansão da produção eólica [Eltra, 2003].

DADOS E RESULTADOS PARA AS REDES DE TESTE

Em seguida são apresentados alguns dos resultados e dados relativos à aplicação do SFPP/CFPP. A maior parte dos dados e os principais resultados estão disponíveis nos respectivos capítulos. Os resultados que se apresentam referem-se sobretudo aos valores obtidos para os cortes de nível α intermédios. Estão assim disponíveis os resultados para as redes de 14, 24 e 118 barramentos do IEEE.

Tabela B.1 – Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência activa (MW) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo DC SFPF para a rede de 24 barramentos do Capítulo 3, secção 3.9

Pi-k	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
P1-2	-48.10	-45.60	-43.09	-40.58	-38.07	-35.56	-33.05	-30.54	-28.03	-25.52	-23.01	-6.28	-3.77	-1.26	1.25	3.76	6.26	8.77	11.28	13.79	16.30	18.81
P1-3	-21.87	-19.67	-17.47	-15.27	-13.07	-10.87	-8.67	-6.47	-4.27	-2.07	0.13	14.80	17.00	19.20	21.40	23.60	25.80	28.00	30.20	32.40	34.60	36.80
P1-5	47.23	49.15	51.06	52.98	54.90	56.81	58.73	60.65	62.56	64.48	66.40	79.18	81.09	83.01	84.93	86.84	88.76	90.68	92.59	94.51	96.43	98.34
P2-4	25.71	27.24	28.78	30.31	31.85	33.38	34.92	36.45	37.99	39.52	41.06	51.30	52.83	54.37	55.90	57.44	58.97	60.51	62.04	63.58	65.11	66.65
P2-6	45.64	47.06	48.48	49.91	51.33	52.75	54.17	55.59	57.01	58.43	59.85	69.32	70.74	72.16	73.58	75.00	76.42	77.84	79.26	80.68	82.10	83.52
P3-9	-75.01	-72.55	-70.08	-67.62	-65.15	-62.69	-60.22	-57.76	-55.29	-52.83	-50.37	-33.94	-31.47	-29.01	-26.54	-24.08	-21.62	-19.15	-16.69	-14.22	-11.76	-9.29
P3-24	-330.60	-326.38	-322.16	-317.95	-313.73	-309.51	-305.30	-301.08	-296.87	-292.65	-288.43	-260.32	-256.11	-251.89	-247.67	-243.46	-239.24	-235.02	-230.81	-226.59	-222.37	-218.16
P4-9	-109.79	-108.12	-106.46	-104.80	-103.14	-101.48	-99.81	-98.15	-96.49	-94.83	-93.16	-82.08	-80.42	-78.76	-77.10	-75.43	-73.77	-72.11	-70.45	-68.78	-67.12	-65.46
P5-10	-81.83	-79.82	-77.81	-75.80	-73.79	-71.77	-69.76	-67.75	-65.74	-63.73	-61.72	-48.31	-46.29	-44.28	-42.27	-40.26	-38.25	-36.24	-34.22	-32.21	-30.20	-28.19
P6-10	-205.54	-203.64	-201.74	-199.84	-197.94	-196.04	-194.14	-192.24	-190.35	-188.45	-186.55	-173.89	-171.99	-170.09	-168.19	-166.29	-164.39	-162.49	-160.59	-158.69	-156.80	-154.90
P7-8	428.75	432.22	435.69	439.16	442.63	446.09	449.56	453.03	456.50	459.97	463.44	486.56	490.03	493.50	496.97	500.44	503.91	507.37	510.84	514.31	517.78	521.25
P8-9	31.64	34.46	37.28	40.10	42.93	45.75	48.57	51.39	54.22	57.04	59.86	78.68	81.50	84.32	87.15	89.97	92.79	95.61	98.44	101.26	104.08	106.90
P8-10	61.28	64.03	66.78	69.53	72.28	75.03	77.77	80.52	83.27	86.02	88.77	107.10	109.84	112.59	115.34	118.09	120.84	123.59	126.34	129.09	131.84	134.58
P9-11	-189.54	-186.98	-184.41	-181.85	-179.29	-176.73	-174.17	-171.61	-169.05	-166.49	-163.93	-146.85	-144.29	-141.73	-139.17	-136.61	-134.05	-131.49	-128.93	-126.37	-123.80	-121.24
P9-12	-254.03	-251.48	-248.93	-246.39	-243.84	-241.29	-238.75	-236.20	-233.65	-231.11	-228.56	-211.59	-209.04	-206.49	-203.95	-201.40	-198.85	-196.31	-193.76	-191.21	-188.67	-186.12
P10-11	-257.52	-254.09	-250.66	-247.23	-243.80	-240.37	-236.95	-233.52	-230.09	-226.66	-223.23	-200.37	-196.94	-193.51	-190.08	-186.65	-183.22	-179.79	-176.37	-172.94	-169.51	-166.08
P10-12	-319.19	-315.99	-312.79	-309.58	-306.38	-303.18	-299.97	-296.77	-293.57	-290.36	-287.16	-265.81	-262.60	-259.40	-256.20	-253.00	-249.79	-246.59	-243.39	-240.18	-236.98	-233.78
P11-13	-337.37	-334.19	-331.01	-327.83	-324.64	-321.46	-318.28	-315.10	-311.92	-308.74	-305.56	-284.35	-281.16	-277.98	-274.80	-271.62	-268.44	-265.26	-262.08	-258.89	-255.71	-252.53
P11-14	-160.05	-153.46	-146.86	-140.27	-133.67	-127.08	-120.49	-113.89	-107.30	-100.70	-94.11	-50.15	-43.56	-36.96	-30.37	-23.77	-17.18	-10.59	-3.99	2.60	9.20	15.79
P12-13	-220.04	-217.11	-214.18	-211.25	-208.31	-205.38	-202.45	-199.52	-196.58	-193.65	-190.72	-171.17	-168.24	-165.31	-162.37	-159.44	-156.51	-153.58	-150.64	-147.71	-144.78	-141.85
P12-23	-369.02	-365.01	-361.00	-357.00	-352.99	-348.98	-344.97	-340.96	-336.96	-332.95	-328.94	-302.22	-298.21	-294.20	-290.20	-286.19	-282.18	-278.17	-274.16	-270.16	-266.15	-262.14
P13-23	-310.15	-305.86	-301.56	-297.26	-292.96	-288.66	-284.37	-280.07	-275.77	-271.47	-267.17	-238.52	-234.22	-229.92	-225.63	-221.33	-217.03	-212.73	-208.43	-204.14	-199.84	-195.54
P14-16	-511.27	-504.53	-497.78	-491.03	-484.28	-477.53	-470.79	-464.04	-457.29	-450.54	-443.79	-398.80	-392.06	-385.31	-378.56	-371.81	-365.06	-358.31	-351.57	-344.82	-338.07	-331.32
P15-16	-92.14	-86.08	-80.03	-73.97	-67.91	-61.86	-55.80	-49.75	-43.69	-37.63	-31.58	8.80	14.86	20.92	26.97	33.03	39.08	45.14	51.20	57.25	63.31	69.37
P15-21	-596.39	-591.67	-586.96	-582.24	-577.53	-572.81	-568.10	-563.38	-558.66	-553.95	-549.23	-517.80	-513.08	-508.37	-503.65	-498.94	-494.22	-489.50	-484.79	-480.07	-475.36	-470.64
P15-24	218.16	222.37	226.59	230.81	235.02	239.24	243.46	247.67	251.89	256.11	260.32	288.43	292.65	296.87	301.08	305.30	309.51	313.73	317.95	322.16	326.38	330.60
P16-17	-328.35	-323.76	-319.16	-314.57	-309.97	-305.38	-300.79	-296.19	-291.60	-287.00	-282.41	-251.78	-247.19	-242.59	-238.00	-233.40	-228.81	-224.21	-219.62	-215.02	-210.43	-205.84
P16-19	-180.15	-172.30	-164.45	-156.60	-148.75	-140.90	-133.05	-125.20	-117.35	-109.50	-101.65	-49.33	-41.48	-33.63	-25.78	-17.93	-10.08	-2.23	5.62	13.47	21.32	29.17
P17-18	-125.05	-121.37	-117.70	-114.02	-110.34	-106.66	-102.98	-99.31	-95.63	-91.95	-88.27	-63.75	-60.08	-56.40	-52.72	-49.04	-45.36	-41.68	-38.01	-34.33	-30.65	-26.97
P17-22	-203.30	-202.38	-201.47	-200.55	-199.63	-198.72	-197.80	-196.88	-195.97	-195.05	-194.14	-188.03	-187.11	-186.19	-185.28	-184.36	-183.45	-182.53	-181.61	-180.70	-179.78	-178.86
P18-21	-422.14	-418.64	-415.13	-411.63	-408.12	-404.62	-401.12	-397.61	-394.11	-390.60	-387.10	-363.73	-360.22	-356.72	-353.21	-349.71	-346.20	-342.70	-339.19	-335.69	-332.18	-328.68
P19-20	-504.73	-496.97	-489.21	-481.46	-473.70	-465.94	-458.18	-450.42	-442.66	-434.90	-427.14	-375.42	-367.66	-359.90	-352.14	-344.38	-336.62	-328.86	-321.10	-313.35	-305.59	-297.83
P20-23	-736.58	-728.72	-720.85	-712.98	-705.11	-697.24	-689.38	-681.51	-673.64	-665.77	-657.91	-605.45	-597.59	-589.72	-581.85	-573.98	-566.12	-558.25	-550.38	-542.51	-534.64	-526.78
P21-22	-224.81	-223.62	-222.43	-221.23	-220.04	-218.85	-217.66	-216.47	-215.28	-214.08	-212.89	-204.95	-203.75	-202.56	-201.37	-200.18	-198.99	-197.79	-196.60	-195.41	-194.22	-193.03

Tabela B.2 – Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência activa (MW) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo DC CFPF para a rede de 24 barramentos do Capítulo 3, secção 3.9

P i-k	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
P1-2'	-23.00	-23.00	-23.00	-23.00	-23.00	-23.00	-23.00	-23.00	-23.00	-23.00	-22.66	-8.80	-6.54	-4.33	-2.13	0.08	2.28	4.49	6.69	8.90	11.10	13.31
P1-3'	-6.77	-5.48	-4.19	-2.89	-1.60	-0.31	0.98	2.28	3.75	5.42	7.67	14.80	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
P1-5'	51.48	52.94	54.39	55.85	57.30	58.75	60.22	61.73	63.51	65.46	68.01	77.20	78.99	80.79	82.58	83.26	83.95	84.63	85.32	86.00	86.69	87.37
P2-4'	27.24	28.62	29.99	31.37	32.75	34.13	35.51	36.88	38.32	40.20	43.02	50.71	52.00	52.00	52.00	52.00	52.00	52.00	52.00	52.00	52.00	52.00
P2-6'	48.40	49.52	50.64	51.76	52.89	54.01	55.13	56.36	57.73	59.16	61.18	68.04	69.00	69.00	69.00	69.00	69.00	69.00	69.00	69.00	69.00	69.00
P3-9'	-50.00	-50.00	-50.00	-50.00	-50.00	-50.00	-50.00	-50.00	-50.00	-50.00	-49.74	-42.77	-41.04	-39.31	-38.15	-37.13	-36.10	-35.08	-34.06	-33.04	-32.02	-31.00
P3-24'	-265.00	-265.00	-265.00	-265.00	-265.00	-265.00	-265.00	-265.00	-265.00	-265.00	-265.00	-260.32	-256.17	-253.39	-251.30	-250.09	-248.88	-247.66	-246.45	-245.23	-244.02	-242.80
P4-9'	-108.38	-106.86	-105.35	-103.83	-102.32	-100.81	-99.29	-97.74	-95.87	-93.71	-90.52	-82.62	-80.98	-79.35	-78.62	-78.12	-77.62	-77.12	-76.62	-76.11	-75.61	-75.11
P5-10'	-77.64	-76.08	-74.52	-72.96	-71.40	-69.84	-68.27	-66.54	-64.64	-62.63	-59.41	-50.17	-48.25	-46.33	-45.08	-44.38	-43.67	-42.97	-42.26	-41.55	-40.85	-40.14
P6-10'	-203.00	-201.35	-199.70	-198.05	-196.40	-194.75	-193.10	-191.29	-189.47	-187.53	-184.49	-175.03	-173.17	-171.32	-169.99	-169.07	-168.15	-167.23	-166.31	-165.40	-164.48	-163.56
P7-8'	428.75	432.22	435.69	439.16	442.63	446.09	449.56	453.03	456.50	459.97	463.44	486.56	490.03	493.50	496.97	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00
P8-9'	34.71	37.33	39.94	42.56	45.18	47.79	50.41	53.06	55.76	58.54	62.03	78.63	81.38	83.98	86.58	88.95	89.81	90.68	91.54	92.40	93.26	94.12
P8-10'	63.03	65.60	68.16	70.73	73.29	75.86	78.42	80.99	83.57	86.27	89.51	106.37	109.16	111.91	114.61	117.09	118.06	119.03	119.99	120.96	121.93	122.90
P9-11'	-173.56	-171.95	-170.33	-168.71	-167.07	-165.43	-163.79	-162.12	-160.29	-158.42	-155.38	-146.85	-144.29	-141.75	-139.39	-137.40	-136.04	-134.68	-133.32	-131.96	-130.61	-129.26
P9-12'	-240.90	-239.35	-237.78	-236.21	-234.62	-233.03	-231.44	-229.83	-227.99	-226.11	-222.89	-211.87	-209.07	-206.49	-203.97	-201.69	-199.96	-198.23	-196.50	-194.78	-193.06	-191.33
P10-11'	-233.50	-231.53	-229.55	-227.57	-225.60	-223.62	-221.61	-219.45	-216.99	-214.46	-211.12	-200.37	-196.98	-194.00	-191.67	-189.56	-187.98	-186.41	-184.85	-183.30	-181.76	-180.22
P10-12'	-299.47	-297.74	-296.00	-294.27	-292.53	-290.79	-289.06	-286.98	-284.54	-282.02	-278.46	-265.88	-262.60	-259.40	-256.43	-254.12	-252.20	-250.29	-248.39	-246.49	-244.60	-242.71
P11-13'	-326.57	-324.59	-322.62	-320.64	-318.66	-316.69	-314.70	-312.50	-310.04	-307.30	-303.96	-284.37	-281.16	-277.98	-274.83	-271.76	-268.74	-265.73	-262.71	-259.70	-256.69	-253.68
P11-14'	-91.38	-89.04	-86.70	-84.35	-82.01	-79.67	-77.33	-74.96	-72.33	-69.41	-66.17	-50.15	-43.61	-38.37	-34.23	-31.15	-28.34	-25.53	-22.73	-19.92	-17.11	-14.31
P12-13'	-205.53	-203.57	-201.62	-199.66	-197.70	-195.74	-193.78	-191.75	-189.46	-187.09	-184.18	-171.18	-168.24	-165.31	-162.37	-159.88	-157.72	-155.60	-153.49	-151.38	-149.26	-147.15
P12-23'	-320.00	-320.00	-320.00	-320.00	-320.00	-320.00	-320.00	-320.00	-319.91	-317.71	-315.29	-302.22	-298.23	-295.18	-292.17	-289.52	-287.21	-284.91	-282.60	-280.32	-278.13	-275.94
P13-23'	-265.00	-265.00	-265.00	-265.00	-265.00	-265.00	-265.00	-264.10	-262.64	-259.74	-256.77	-238.52	-234.23	-230.62	-227.07	-223.89	-220.95	-218.01	-215.07	-212.13	-209.19	-206.25
P14-16'	-444.18	-441.57	-438.96	-436.34	-433.73	-431.12	-428.51	-425.90	-423.06	-419.82	-416.16	-398.80	-392.12	-386.41	-381.52	-378.26	-375.16	-372.07	-368.98	-365.89	-362.79	-359.70
P15-16'	-71.13	-67.64	-64.14	-60.64	-57.14	-53.65	-48.93	-42.79	-36.64	-30.49	-24.34	-2.99	5.43	11.82	17.62	23.15	28.67	34.20	39.72	45.23	50.74	56.25
P15-21'	-583.90	-580.35	-576.79	-573.24	-569.68	-566.07	-561.95	-557.83	-552.64	-545.53	-537.53	-517.80	-513.08	-508.37	-503.82	-499.28	-494.78	-490.29	-485.79	-481.32	-476.97	-472.62
P15-24'	242.80	244.02	245.23	246.45	247.66	248.88	250.09	251.31	253.39	256.17	260.32	265.00	265.00	265.00	265.00	265.00	265.00	265.00	265.00	265.00	265.00	265.00
P16-17'	-319.70	-315.73	-311.76	-307.79	-303.82	-299.58	-295.22	-290.86	-285.74	-279.20	-271.73	-253.47	-248.85	-244.24	-239.62	-235.01	-230.73	-226.73	-222.73	-218.74	-214.74	-210.75
P16-19'	-115.49	-114.27	-113.05	-111.82	-110.60	-109.38	-108.16	-106.94	-105.72	-104.49	-98.99	-67.62	-60.78	-54.38	-48.31	-42.41	-36.52	-30.64	-24.75	-18.87	-13.01	-7.14
P17-18'	-119.28	-115.78	-112.29	-108.80	-105.30	-101.81	-98.32	-94.82	-91.27	-87.55	-81.49	-65.21	-61.52	-57.82	-54.12	-50.43	-47.02	-43.86	-40.70	-37.54	-34.37	-31.21
P17-22'	-201.37	-200.87	-200.38	-199.88	-199.23	-198.33	-197.44	-196.54	-195.59	-194.61	-193.58	-188.26	-187.34	-186.42	-185.50	-184.58	-183.71	-182.87	-182.04	-181.20	-180.37	-179.53
P18-21'	-421.32	-418.01	-414.68	-411.34	-407.98	-404.52	-401.06	-397.58	-393.63	-389.37	-384.73	-366.09	-362.83	-359.58	-356.33	-353.07	-349.82	-346.57	-343.31	-340.06	-336.81	-333.55
P19-20'	-425.00	-425.00	-425.00	-425.00	-425.00	-425.00	-425.00	-425.00	-425.00	-425.00	-425.00	-395.61	-389.48	-383.72	-378.30	-373.08	-367.86	-362.64	-357.41	-352.19	-346.97	-341.74
P20-23'	-666.92	-666.06	-665.19	-664.33	-663.46	-662.60	-661.74	-660.87	-660.01	-659.14	-657.12	-626.65	-620.82	-615.31	-610.05	-605.04	-600.03	-595.03	-590.02	-585.01	-580.00	-574.99
P21-22'	-215.00	-215.00	-215.00	-215.00	-215.00	-215.00	-215.00	-215.00	-214.95	-213.77	-212.60	-205.34	-203.99	-202.76	-201.56	-200.36	-199.16	-197.97	-196.77	-195.57	-194.37	-193.17

Tabela B.3 – Resultados para as distribuições de possibilidade das potências activas injectadas (MW) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo DC CFPF para a rede de 24 barramentos do Capítulo 3, secção 3.9

Pi	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
P1	42.88	44.58	46.29	47.99	49.70	51.40	53.10	54.81	56.51	58.22	59.92	71.28	72.98	74.69	76.39	78.10	79.80	81.50	83.21	84.91	86.62	88.32
P2	101.67	103.45	105.23	107.01	108.79	110.57	112.35	114.13	115.91	117.69	119.47	131.33	133.11	134.89	136.67	138.45	140.23	142.01	143.79	144.00	144.00	144.00
P3	-330.00	-330.00	-330.00	-330.00	-330.00	-330.00	-330.00	-330.00	-330.00	-329.26	-328.05	-319.95	-318.74	-317.52	-316.31	-315.09	-313.88	-312.66	-311.45	-310.23	-309.02	-307.80
P4	-140.49	-139.99	-139.49	-138.98	-138.48	-137.98	-137.48	-136.98	-136.48	-135.97	-135.47	-132.13	-131.63	-131.12	-130.62	-130.12	-129.62	-129.12	-128.62	-128.11	-127.61	-127.11
P5	-134.19	-133.71	-133.23	-132.75	-132.27	-131.79	-131.31	-130.84	-130.36	-129.88	-129.40	-126.20	-125.72	-125.24	-124.76	-124.29	-123.81	-123.33	-122.85	-122.37	-121.89	-121.41
P6	-257.04	-256.12	-255.20	-254.29	-253.37	-252.45	-251.53	-250.61	-249.70	-248.78	-247.86	-241.74	-240.82	-239.90	-238.99	-238.07	-237.15	-236.23	-235.31	-234.40	-233.48	-232.56
P7	428.75	432.22	435.69	439.16	442.63	446.09	449.56	453.03	456.50	459.97	463.44	486.56	490.03	493.50	496.97	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00
P8	-323.19	-322.04	-320.88	-319.73	-318.57	-317.42	-316.26	-315.11	-313.96	-312.80	-311.65	-303.95	-302.80	-301.64	-300.49	-299.34	-298.18	-297.03	-295.87	-294.72	-293.56	-292.41
P9	-330.75	-329.57	-328.39	-327.21	-326.02	-324.84	-323.66	-322.48	-321.30	-320.12	-318.94	-311.06	-309.88	-308.70	-307.52	-306.34	-305.16	-303.98	-302.79	-301.61	-300.43	-299.25
P10	-368.55	-367.23	-365.92	-364.60	-363.28	-361.97	-360.65	-359.34	-358.02	-356.70	-355.39	-346.61	-345.30	-343.98	-342.66	-341.35	-340.03	-338.72	-337.40	-336.08	-334.77	-333.45
P11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P13	164.15	168.56	172.98	177.39	181.80	186.22	190.63	195.05	199.46	203.87	208.29	237.71	242.13	246.54	250.95	255.37	259.78	264.19	268.61	273.02	277.44	281.85
P14	-366.66	-365.35	-364.04	-362.73	-361.42	-360.11	-358.80	-357.49	-356.18	-354.87	-353.57	-344.84	-343.53	-342.22	-340.91	-339.60	-338.29	-336.98	-335.67	-334.36	-333.05	-331.74
P15	-314.13	-310.87	-307.60	-304.34	-301.07	-297.81	-294.54	-291.28	-288.01	-284.75	-281.48	-259.72	-256.45	-253.19	-249.92	-246.66	-243.39	-240.13	-236.86	-233.60	-230.33	-227.07
P16	67.50	69.19	70.88	72.56	74.25	75.94	77.63	79.31	81.00	82.69	84.38	95.63	97.31	99.00	100.69	102.37	104.06	105.75	107.44	109.12	110.81	112.50
P17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P18	-344.37	-341.00	-337.62	-334.25	-330.88	-327.51	-324.13	-320.76	-317.39	-314.02	-310.64	-288.16	-284.78	-281.41	-278.04	-274.67	-271.29	-267.92	-264.55	-261.18	-257.80	-254.43
P19	-342.09	-340.87	-339.65	-338.42	-337.20	-335.98	-334.76	-333.54	-332.32	-331.09	-329.87	-321.73	-320.51	-319.28	-318.06	-316.84	-315.62	-314.40	-313.18	-311.95	-310.73	-309.51
P20	-241.92	-241.06	-240.19	-239.33	-238.46	-237.60	-236.74	-235.87	-235.01	-234.14	-233.28	-227.52	-226.66	-225.79	-224.93	-224.06	-223.20	-222.34	-221.47	-220.61	-219.74	-218.88
P21	665.00	667.63	670.25	672.88	675.50	678.13	680.75	683.38	686.00	688.63	691.25	708.75	711.37	714.00	716.62	719.25	721.88	724.50	727.12	729.75	732.37	735.00
P22	380.00	381.50	383.00	384.50	386.00	387.50	389.00	390.50	392.00	393.50	395.00	405.00	406.50	408.00	409.50	411.00	412.50	414.00	414.88	415.38	415.87	416.37
P23	1140.00	1144.50	1149.00	1153.50	1158.00	1162.50	1167.00	1171.50	1176.00	1180.50	1185.00	1215.00	1219.50	1224.00	1228.50	1233.00	1237.50	1242.00	1246.50	1250.20	1251.10	1251.90
P24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabela B.4 - Limites dos ramos utilizados (pu) na rede de 118 barramentos do Capítulo 3, secção 3.10

S limite	MVA	S limite	MVA	S limite	MVA	S limite	MVA	S limite	MVA	S limite	MVA	S limite	MVA	S limite	MVA	S limite	MVA	S limite	MVA
1-2	18.85	12-16	11.92	23-24	18.28	34-36	32.13	46-47	32.89	55-56	25.11	66-67	72.00	77-80	160.55	88-89	103.80	100-103	130.31
1-3	43.83	12-117	21.50	23-25	168.50	34-37	107.94	46-48	17.25	55-59	38.11	68-69	182.00	77-82	28.31	89-90	173.81	100-104	65.00
2-12	39.51	13-15	42.00	23-32	97.37	34-43	6.54	47-49	17.82	56-57	26.99	68-81	130.00	78-79	35.08	89-92	320.00	100-106	63.38
3-12	71.63	14-15	42.00	24-70	17.00	35-36	10.00	47-69	61.81	56-58	9.84	68-116	201.49	79-80	74.38	90-91	20.00	101-102	43.97
3-5	16.46	15-17	110.09	24-72	6.03	35-37	42.00	48-49	37.10	56-59	62.45	69-70	114.07	80-81	107.22	91-92	25.00	103-104	36.23
4-5	109.33	15-19	73.00	25-26	101.09	37-38	275.98	49-50	58.10	59-60	46.91	69-75	117.30	80-96	33.36	92-93	85.00	103-105	46.56
4-11	85.00	15-33	52.00	25-27	149.01	37-39	60.37	49-51	72.99	59-61	55.33	69-77	75.25	80-97	42.32	92-94	80.00	103-110	63.90
5-6	91.34	16-17	56.00	26-30	228.90	37-40	49.24	49-54	84.17	59-63	174.63	70-71	24.44	80-98	38.28	92-100	42.00	104-105	51.47
5-8	369.61	17-18	100.00	27-28	34.70	38-65	205.34	49-66	276.88	60-61	172.00	70-74	22.94	80-99	28.54	92-102	49.21	105-106	11.58
5-11	90.00	17-30	255.76	27-32	14.30	39-40	33.86	49-69	52.32	60-62	33.00	70-75	20.00	82-83	62.42	93-94	70.00	105-107	27.96
6-7	58.00	17-31	21.75	27-115	22.58	40-41	20.79	50-57	39.47	61-62	50.00	71-72	14.46	82-96	16.80	94-95	48.83	105-108	28.95
7-12	20.58	17-113	7.78	28-29	18.70	40-42	16.97	51-52	30.78	61-64	40.98	71-73	12.47	83-84	32.59	94-96	50.00	106-107	25.33
8-9	454.39	18-19	30.00	29-31	13.54	41-42	26.90	51-58	21.41	62-66	42.87	74-75	56.02	83-85	49.60	94-100	55.44	108-109	26.86
8-30	92.15	19-20	14.24	30-38	84.09	42-49	137.61	52-53	11.94	62-67	30.43	75-77	40.29	84-85	41.28	95-96	25.90	109-110	21.46
9-10	451.15	19-34	40.00	31-32	34.94	43-44	20.76	53-54	15.49	63-64	174.63	75-118	51.11	85-86	19.45	96-97	27.04	110-111	35.94
11-12	53.63	20-21	31.05	32-113	32.00	44-45	37.71	54-55	8.43	64-65	210.90	76-77	68.77	85-88	80.00	98-100	13.56	110-112	78.23
11-13	70.00	21-22	44.91	32-114	16.00	45-46	39.10	54-56	24.16	65-66	78.66	76-118	15.29	85-89	95.00	99-100	30.81	114-115	2.73
12-14	67.00	22-23	55.79	33-37	23.68	45-49	52.68	54-59	33.92	65-68	51.99	77-78	51.48	86-87	16.40	100-101	31.70		

Tabela B.5 – Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência aparente (MVA) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo AC SFPF para a rede de 118 barramentos do Capítulo 3, secção 3.10: ramo 1-2 a ramo 27-28

Sik	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
1-2	13.66	13.91	14.15	14.40	14.64	14.89	15.13	15.45	15.96	16.64	17.65	18.26	19.56	20.80	22.10	23.46	24.88	26.33	27.81	29.31	30.84	32.38
1-3	21.28	21.96	22.43	23.61	25.25	27.26	29.64	32.26	35.10	38.25	41.60	42.89	46.32	49.77	52.95	56.16	59.38	62.60	65.82	69.04	72.25	75.46
2-12	25.89	25.76	26.63	27.62	28.74	29.98	31.33	32.75	34.24	35.83	37.57	38.66	40.49	42.25	44.06	45.89	47.74	49.63	51.53	53.46	55.40	57.36
3-5	43.69	45.99	48.37	50.78	53.22	55.74	58.27	60.81	63.35	65.89	68.77	70.45	73.28	75.74	78.13	80.69	83.08	85.46	88.07	90.45	92.83	95.20
3-12	13.06	13.23	13.37	13.54	13.69	13.89	14.12	14.24	14.56	15.00	15.58	16.01	16.83	17.69	18.64	19.65	20.85	21.97	23.14	24.35	25.59	26.85
4-5	53.12	58.16	63.26	68.39	73.69	79.00	84.30	89.56	94.79	100.03	105.47	107.83	113.20	118.17	123.09	127.99	132.87	137.73	142.59	147.43	152.26	157.09
4-11	31.58	34.60	37.65	40.74	43.85	46.97	50.15	53.34	56.54	59.76	63.29	65.15	68.71	71.92	75.12	78.33	81.55	84.76	87.98	91.20	94.42	97.64
5-6	47.49	51.42	55.37	59.32	63.27	67.32	71.20	75.04	78.91	82.70	87.33	89.80	94.29	97.76	101.17	104.53	107.86	111.16	114.41	117.64	120.83	123.99
5-8	216.20	229.68	243.30	257.00	271.25	285.37	299.56	313.67	327.46	341.12	356.65	364.79	379.52	391.44	403.03	414.32	425.28	435.74	446.02	455.49	464.66	473.92
5-11	42.66	45.89	49.15	52.42	55.76	59.11	62.47	65.83	69.20	72.60	76.32	78.24	81.94	85.25	88.53	91.81	95.09	98.37	101.63	104.93	108.18	111.44
6-7	0.87	1.12	1.37	2.95	6.47	11.02	15.62	20.27	24.93	29.67	34.64	37.07	42.08	46.66	51.21	55.75	60.27	64.77	69.27	73.75	78.18	82.68
7-12	1.06	1.20	1.33	1.47	1.60	2.02	2.75	3.93	7.37	11.32	16.44	18.99	24.18	28.30	32.50	36.60	40.86	44.99	49.14	53.30	57.77	62.01
8-9	430.14	431.60	433.06	434.52	435.98	437.44	438.91	440.37	441.84	443.31	446.61	452.72	456.07	457.55	459.03	460.51	461.99	463.47	464.96	466.44	467.93	469.41
8-30	28.18	28.61	29.06	29.54	30.08	30.66	32.35	37.23	45.06	56.42	73.35	85.42	104.85	120.97	137.53	154.49	171.76	188.98	205.68	222.11	238.37	254.48
9-10	424.04	425.68	427.32	428.97	430.61	432.25	433.89	435.53	437.17	438.81	442.51	449.30	453.04	454.68	456.32	457.96	459.60	461.24	462.88	464.52	466.16	467.80
11-12	17.36	19.10	20.83	22.55	24.27	26.06	28.69	31.78	35.74	40.89	47.11	51.09	57.93	64.80	71.89	79.13	86.50	94.22	101.76	109.36	117.02	124.72
11-13	11.79	12.56	13.34	14.13	15.10	16.36	18.53	21.78	25.74	30.31	35.57	38.22	43.71	48.87	54.08	59.32	64.56	69.80	75.05	80.29	85.53	90.75
12-14	5.11	5.37	5.63	5.89	6.16	6.42	6.69	6.96	8.21	11.71	17.01	19.99	25.79	31.04	36.30	41.53	46.75	51.96	57.16	62.32	67.46	72.56
12-16	0.94	1.39	1.88	2.38	2.88	3.38	3.89	4.41	4.93	5.46	7.44	9.98	15.82	21.58	27.45	33.38	39.40	45.39	51.38	57.38	63.36	69.30
12-117	16.44	16.85	17.25	17.66	18.07	18.48	18.89	19.30	19.71	20.12	20.54	21.09	21.50	21.92	22.33	22.75	23.16	23.58	23.99	24.41	24.83	25.25
13-15	0.33	0.59	0.84	1.09	1.35	1.61	1.87	2.22	2.59	2.96	3.46	4.69	8.91	12.98	17.18	21.44	25.74	30.09	34.45	38.84	43.23	47.64
14-15	3.28	3.38	3.47	3.57	3.66	3.76	3.85	3.95	4.04	4.13	4.50	6.33	11.33	15.87	20.53	25.25	30.07	34.92	39.80	44.72	49.65	54.62
15-17	66.61	70.09	73.79	77.66	81.66	85.74	89.79	93.76	97.63	101.34	105.14	107.97	111.76	115.06	118.31	121.54	124.89	128.09	131.28	134.44	137.59	140.72
15-19	18.39	18.39	18.39	18.39	18.39	18.39	18.39	18.39	18.39	18.39	18.90	20.25	24.43	29.89	35.38	41.42	47.73	54.32	61.07	67.83	74.35	80.31
15-33	0.01	0.01	0.01	0.16	0.24	0.53	0.81	1.10	1.37	1.96	5.87	11.21	18.01	24.02	30.03	36.06	41.57	46.57	50.55	53.71	56.79	59.96
16-17	5.93	6.14	6.34	6.55	6.76	6.97	7.19	7.41	8.31	11.35	16.40	19.41	24.99	29.66	34.23	38.56	42.79	46.92	50.95	54.89	59.17	63.09
17-18	42.44	44.59	47.43	50.83	54.66	58.80	63.16	67.67	72.35	77.22	82.64	84.50	90.74	95.34	99.51	103.56	107.48	111.37	115.23	119.06	122.86	126.64
17-30	173.98	180.09	186.55	192.95	200.12	207.28	214.72	222.76	229.94	237.72	246.26	252.12	260.18	267.34	274.35	281.28	288.11	294.82	301.55	308.14	314.65	321.09
17-31	14.93	14.96	14.99	15.02	15.05	15.08	15.12	15.15	15.40	16.16	17.70	19.86	22.74	25.90	29.37	33.11	37.06	41.31	45.28	49.11	52.76	56.25
17-113	4.59	4.74	4.90	5.05	5.21	5.37	5.52	5.68	5.83	5.99	6.14	6.30	7.72	10.22	12.55	15.91	19.03	22.40	25.49	28.50	31.27	33.90
18-19	20.64	20.64	20.64	20.64	20.64	20.65	20.66	20.66	21.00	22.38	24.89	26.52	30.05	33.89	37.61	41.44	45.25	49.06	52.82	56.63	60.40	64.15
19-20	0.01	0.25	0.01	0.41	0.93	1.50	2.16	2.95	5.10	7.78	10.63	13.00	15.79	18.47	21.01	23.50	25.97	28.40	30.82	33.20	35.56	37.90
19-34	11.00	10.99	10.99	10.99	10.99	10.99	10.99	10.99	10.99	10.99	11.00	11.00	14.26	18.33	22.90	27.64	32.24	36.82	41.09	45.01	48.75	52.33
20-21	5.74	7.07	9.26	11.49	13.93	16.35	18.82	21.24	23.56	25.75	28.00	30.11	32.26	34.22	36.06	37.87	39.63	41.36	43.05	44.70	46.34	47.96
21-22	20.44	22.38	24.39	26.45	28.66	30.99	33.28	35.57	37.71	39.81	41.87	43.88	45.92	47.81	49.59	51.33	53.03	54.67	56.30	57.89	59.47	61.02
22-23	30.51	32.52	34.60	36.65	38.97	41.34	43.75	46.03	48.28	50.46	52.61	54.70	56.83	58.74	60.54	62.30	64.02	65.71	67.37	69.04	70.69	72.29
23-24	8.59	8.90	9.20	9.51	9.84	10.17	10.51	10.85	11.20	11.56	12.08	15.18	19.43	23.64	27.69	31.59	35.32	38.84	42.09	45.20	48.17	51.03
23-25	130.28	133.13	136.09	139.15	142.22	145.33	148.51	152.04	156.14	159.44	162.81	166.50	169.74	172.53	175.18	177.70	180.17	182.58	184.92	187.25	189.54	191.79
23-32	66.52	67.52	69.90	72.31	74.76	77.24	79.78	82.50	85.28	88.17	91.31	95.01	98.22	101.68	105.22	108.69	112.06	115.47	118.74	121.86	124.92	127.91
24-70	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09	3.10	3.54	5.39	8.45	12.06	16.02	19.64	23.10	26.41	29.54	32.57	35.56	38.46	41.18
24-72	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.57	3.58	3.56	4.30	6.74	9.29	11.61	13.81	15.90	17.89	19.78	21.60	23.34	25.01
25-26	47.60	50.76	53.96	57.39	61.05	64.64	68.67	73.27	77.87	82.88	88.02	97.60	102.94	107.94	112.80	117.62	122.31	126.89	131.38	135.84	140.33	144.69
25-27	127.44	129.23	131.02	132.80	134.57	136.33	138.09	139.84	141.62	143.46	145.49	147.71	149.74	151.59	153.31	155.01	156.69	158.37	160.03	161.69	163.33	164.96
26-30	163.85	168.57	173.80	179.06	184.31	190.17	196.95	203.07	209.37	215.18	221.13	226.74	231.88	236.23	240.09	243.84	247.20	250.38	253.56	256.43	259.20	261.75
27-28	16.68	18.10	19.57	21.08	22.61	24.12	25.70	27.30	28.88	30.47	32.08	33.68	35.21	36.66	38.10	39.51	40.89	42.26	43.62	44.97	46.30	47.63

Tabela B.6 – Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência aparente (MVA) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo AC SFPF para a rede de 118 barramentos do Capítulo 3, seção 3.10: ramo 27-32 a ramo 54-59

Sik	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
27-32	5.27	5.30	5.37	5.70	6.23	6.91	7.72	8.61	9.60	10.71	11.94	13.26	14.61	15.91	17.22	18.48	19.74	21.00	22.26	23.53	24.80	26.06
27-115	13.12	13.83	14.54	15.27	15.99	16.73	17.46	18.22	19.02	19.91	20.82	21.84	22.73	23.55	24.35	25.16	25.97	26.76	27.55	28.34	29.14	29.94
28-29	2.54	3.33	4.45	5.73	7.03	8.50	10.01	11.54	13.08	14.63	16.20	17.61	19.24	20.64	22.01	23.34	24.67	25.98	27.28	28.57	29.84	31.15
29-31	8.01	8.26	8.51	8.75	9.01	9.26	9.54	9.91	10.37	10.92	11.61	12.53	13.46	14.46	15.53	16.71	18.00	19.29	20.61	21.98	23.46	26.69
30-38	18.46	19.13	19.84	20.57	21.39	22.14	22.98	23.90	25.57	36.79	55.84	74.70	96.23	114.59	132.72	150.92	167.41	182.48	194.39	205.89	215.16	223.91
31-32	5.10	7.38	9.84	12.25	14.83	17.44	20.12	22.83	25.56	28.29	31.14	33.54	36.33	38.99	41.50	43.98	46.47	48.91	51.30	53.68	56.07	58.41
32-113	15.92	15.92	15.92	15.92	15.93	15.93	15.95	15.92	16.07	16.57	17.63	18.95	20.69	22.34	24.01	25.73	27.57	29.32	31.28	33.04	34.80	36.55
32-114	2.02	2.24	2.67	3.25	3.92	4.65	5.43	6.25	7.10	8.01	8.97	10.11	11.10	12.02	12.91	13.82	14.72	15.64	16.55	17.48	18.39	19.30
33-37	12.32	12.54	12.75	12.98	13.21	13.46	13.69	13.97	14.20	14.69	17.25	20.75	25.79	30.86	35.95	40.91	45.61	49.86	53.92	57.66	61.23	64.64
34-36	16.26	17.25	18.34	19.53	20.79	22.11	23.48	24.92	26.39	27.97	30.00	31.16	33.23	34.82	36.42	38.03	39.65	41.27	42.90	44.53	46.16	47.80
34-37	63.40	67.07	70.89	74.75	78.73	82.63	86.63	90.62	94.36	98.32	102.63	105.63	110.11	114.27	118.48	122.74	127.04	131.39	135.78	140.27	144.72	149.20
34-43	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.34	0.68	1.02	1.39	1.75	3.79	7.48	10.97	14.49	18.03	21.61	25.26	28.82	32.35	36.39	39.84
35-36	0.52	0.82	1.12	1.43	1.74	2.05	2.37	2.71	3.06	3.41	3.87	4.30	5.21	6.54	8.02	9.58	11.27	12.96	14.67	16.40	18.14	19.94
35-37	22.05	23.26	24.52	25.83	27.18	28.57	30.01	31.46	32.92	34.37	35.85	36.71	38.20	39.70	41.03	42.37	43.71	45.06	46.41	47.76	49.12	50.48
37-38	189.48	196.93	204.57	212.25	220.02	227.72	235.28	242.79	250.11	257.53	265.26	271.90	279.44	286.19	292.84	299.55	305.85	311.72	317.42	322.97	328.41	333.77
37-39	16.61	18.74	21.41	24.49	27.91	31.56	35.38	39.30	43.43	47.80	52.45	57.57	62.14	66.32	70.39	74.37	78.25	82.04	85.74	89.35	92.93	96.33
37-40	9.41	11.20	13.62	16.41	19.57	22.91	26.32	29.89	33.61	37.54	41.76	46.57	50.69	54.36	57.92	61.41	64.78	68.04	71.19	74.29	77.30	80.21
38-65	88.27	90.18	94.75	101.42	109.68	119.34	130.10	141.69	153.95	166.83	181.70	198.73	213.46	225.45	236.42	246.35	255.48	263.69	271.28	278.33	284.65	290.52
39-40	0.01	0.00	0.01	0.06	1.10	3.27	7.02	11.28	15.78	20.53	25.71	30.91	35.92	40.44	44.85	49.15	53.36	57.45	61.43	65.34	69.14	72.88
40-41	2.69	2.99	3.29	3.59	3.90	4.20	4.51	4.96	6.65	9.46	13.25	17.75	22.06	26.08	30.13	34.18	38.21	42.25	46.29	50.33	54.82	58.74
40-42	9.71	9.71	9.72	9.74	9.71	9.71	9.71	9.71	9.73	10.31	12.09	15.01	18.01	20.71	23.38	26.02	28.61	31.13	33.60	36.01	38.37	40.68
41-42	12.88	13.02	13.08	13.23	13.29	13.40	13.56	14.35	15.91	18.19	21.16	24.76	28.04	30.92	33.68	36.38	39.01	41.56	44.05	46.47	48.85	51.17
42-49	55.21	61.29	68.45	75.88	83.29	90.61	97.85	105.04	112.10	119.00	126.15	134.09	140.60	146.16	151.33	156.27	160.96	165.46	169.86	174.07	178.14	182.08
43-44	3.59	3.85	4.08	4.33	4.57	4.82	5.11	6.28	8.42	11.22	14.59	18.67	22.08	25.01	27.65	30.16	32.57	34.89	37.09	39.22	41.28	43.27
44-45	0.05	0.38	3.11	6.41	9.75	13.04	16.53	20.05	23.55	27.08	30.93	35.50	39.11	42.21	45.04	47.72	50.35	52.82	55.18	57.45	59.66	61.81
45-46	16.76	18.49	20.24	22.03	23.87	25.72	27.58	29.43	31.30	33.20	35.26	37.75	39.75	41.43	43.05	44.62	46.14	47.62	49.07	50.48	51.85	53.18
45-49	28.39	30.15	32.00	33.90	35.85	37.85	39.88	41.95	44.00	46.11	48.30	51.17	53.20	54.99	56.73	58.43	60.08	61.70	63.28	64.83	66.35	67.84
46-47	18.42	19.61	20.86	22.17	23.45	24.69	25.89	27.06	28.19	29.31	30.40	31.83	32.88	33.92	34.95	35.97	36.99	38.00	39.00	40.00	40.99	41.98
46-48	9.78	10.03	10.36	10.79	11.29	11.86	12.47	13.13	13.82	14.55	15.28	16.30	17.24	18.00	18.77	19.55	20.34	21.14	21.94	22.73	23.54	24.34
47-49	11.17	11.41	11.62	11.87	12.08	12.33	12.55	12.80	13.06	13.31	13.72	15.56	17.47	19.63	22.06	24.69	27.47	30.39	33.44	36.49	39.15	41.81
47-69	22.09	24.81	27.71	30.62	34.09	37.52	40.94	44.36	47.79	51.12	54.40	59.79	62.77	65.63	68.38	71.03	73.59	76.08	78.48	80.83	83.13	85.41
48-49	22.25	23.40	24.57	25.75	26.95	28.14	29.35	30.66	31.75	32.96	34.12	35.95	37.13	38.30	39.46	40.62	41.77	42.93	44.07	45.22	46.36	47.51
49-50	38.74	40.16	41.61	43.09	44.58	46.09	47.64	49.22	50.81	52.43	54.07	56.52	58.17	59.74	61.31	62.87	64.44	65.99	67.54	69.09	70.63	72.17
49-51	50.55	52.17	53.83	55.53	57.26	59.02	60.83	62.64	64.46	66.33	68.24	71.09	73.00	74.86	76.71	78.57	80.43	82.29	84.14	86.00	87.86	89.71
49-54	51.53	53.69	55.98	58.39	60.90	63.43	66.07	68.74	71.47	74.25	77.10	81.42	84.41	87.27	90.15	93.03	95.94	98.87	101.80	104.65	107.49	110.31
49-66	188.83	190.56	196.93	203.81	210.83	218.56	226.13	234.01	241.94	249.87	258.53	270.92	278.94	286.40	293.80	301.21	308.62	316.03	323.43	330.84	338.26	345.62
49-69	14.22	16.74	19.32	22.36	25.55	28.81	32.06	35.30	38.57	41.83	45.01	50.38	53.30	56.08	58.76	61.35	63.84	66.26	68.61	70.90	73.16	75.33
50-57	23.72	24.76	25.83	26.95	28.11	29.31	30.56	31.84	33.16	34.52	35.93	38.03	39.47	40.85	42.22	43.59	44.96	46.33	47.69	49.05	50.41	51.76
51-52	19.74	20.58	21.44	22.31	23.18	24.06	24.94	25.83	26.73	27.65	28.57	29.88	30.77	31.66	32.55	33.43	34.31	35.19	36.07	36.94	37.81	38.68
51-58	7.40	7.98	8.70	9.59	10.59	11.69	12.83	14.03	15.28	16.61	18.00	20.06	21.42	22.79	24.15	25.50	26.86	28.22	29.56	30.91	32.25	33.58
52-53	2.91	3.45	4.05	4.72	5.43	6.16	6.89	7.63	8.38	9.16	9.97	11.14	11.93	12.72	13.51	14.30	15.09	15.87	16.66	17.44	18.22	19.00
53-54	5.50	6.02	6.59	7.26	8.00	8.78	9.61	10.46	11.34	12.24	13.17	14.49	15.47	16.42	17.38	18.35	19.32	20.29	21.26	22.24	23.22	24.20
54-55	3.07	3.17	3.32	3.53	3.56	3.93	4.40	4.92	5.48	6.07	6.70	7.73	8.40	9.08	9.76	10.44	11.13	11.81	12.50	13.19	13.88	14.57
54-56	9.29	9.29	9.29	9.29	9.29	9.30	9.50	10.49	12.18	14.33	16.85	21.18	24.06	26.94	29.85	32.79	35.75	38.72	41.70	44.69	47.68	50.67
54-59	17.71	18.63	19.66	20.75	21.92	23.13	24.39	25.72	27.10	28.55	30.08	32.48	33.98	35.47	36.96	38.47	39.97	41.49	43.01	44.53	46.05	47.58

Tabela B.7 – Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência aparente (MVA) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo AC SFPF para a rede de 118 barramentos do Capítulo 3, secção 3.10: ramo 55-56 a ramo 80-99

Sik	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
55-56	12.16	12.27	12.57	13.10	13.82	14.71	15.76	16.92	18.20	19.57	21.04	22.76	24.98	26.76	28.45	30.32	32.10	33.91	35.75	37.55	39.36	41.18
55-59	21.34	22.39	23.50	24.67	25.89	27.16	28.46	29.82	31.24	32.71	34.25	36.58	38.18	39.68	41.19	42.70	44.21	45.73	47.25	48.78	50.31	51.84
56-57	15.84	16.14	16.57	17.13	17.82	18.61	19.50	20.46	21.49	22.60	23.80	25.66	26.92	28.19	29.48	30.78	32.09	33.40	34.72	36.05	37.37	38.69
56-58	2.74	3.07	3.38	3.70	4.02	4.33	4.66	4.97	5.37	5.92	6.83	8.48	9.73	11.01	12.32	13.66	15.01	16.36	17.73	19.09	20.46	21.82
56-59	32.47	34.24	36.26	38.43	40.70	43.08	45.51	47.98	50.54	53.11	55.72	59.96	62.58	65.17	67.78	70.40	73.03	75.66	78.31	80.95	83.61	86.41
59-60	16.85	19.23	21.64	24.08	26.55	29.05	31.57	34.10	36.67	39.25	41.84	45.02	47.19	49.30	51.41	53.53	55.71	57.85	60.00	62.15	64.34	66.48
59-61	29.55	31.55	33.57	35.60	37.65	39.72	41.81	43.93	46.05	48.19	50.34	53.52	55.47	57.36	59.27	61.18	63.09	65.01	66.94	68.98	70.93	72.86
59-63	119.21	122.97	126.85	130.83	134.92	139.17	143.58	148.05	152.60	157.26	162.01	170.14	175.04	179.90	184.68	189.70	194.42	199.10	203.76	208.38	212.99	217.54
60-61	73.37	76.97	80.59	84.22	87.87	91.54	95.22	98.93	102.66	106.42	110.23	114.47	120.94	127.22	133.11	138.96	144.75	150.49	156.18	161.83	167.44	173.01
60-62	7.56	7.71	7.85	7.99	8.12	8.27	8.41	8.65	9.25	10.04	11.36	13.03	15.15	17.06	19.03	21.02	23.10	25.07	27.03	29.00	30.97	32.92
61-62	8.86	9.89	11.26	12.90	14.69	16.60	18.58	20.63	22.74	24.93	27.25	30.76	33.28	35.70	38.11	40.47	42.84	45.20	47.55	49.90	52.24	54.57
61-64	13.11	13.75	14.56	15.38	16.19	17.33	18.57	20.24	22.85	26.19	30.05	37.29	43.18	48.92	54.63	60.30	65.91	71.45	77.41	82.80	88.11	93.35
62-66	30.25	31.02	31.84	32.71	33.63	34.59	35.58	36.63	37.72	38.87	40.04	41.89	43.00	44.10	45.21	46.30	47.40	48.55	49.64	50.73	51.82	52.89
62-67	16.13	16.58	16.93	17.48	18.00	18.96	20.20	21.66	23.32	25.18	27.25	29.23	30.87	32.50	34.19	35.86	37.53	39.25	40.95	42.64	44.34	46.04
63-64	119.22	122.99	126.87	130.86	134.95	139.20	143.63	148.12	152.67	157.25	162.00	170.13	175.03	179.90	184.67	189.72	194.44	199.13	203.79	208.43	213.02	217.58
64-65	107.12	113.44	120.29	127.52	135.09	142.97	151.15	159.57	168.28	177.26	186.52	202.67	213.23	223.96	234.14	244.13	253.91	263.49	272.88	282.08	291.02	299.80
65-66	72.24	72.24	72.24	72.24	72.24	72.24	72.24	72.24	72.24	72.24	72.24	74.42	77.99	82.76	89.46	96.31	103.70	111.45	119.44	127.47	135.58	143.70
65-68	21.23	21.23	21.23	21.23	21.23	21.23	21.23	21.23	21.23	21.22	21.24	21.24	29.27	43.73	59.25	74.60	89.35	103.44	116.78	129.57	141.92	141.92
66-67	36.31	38.05	39.84	41.65	43.50	45.35	47.25	49.19	51.18	53.22	55.28	57.80	60.48	63.16	65.85	68.54	71.23	73.91	76.60	79.28	81.95	84.62
68-69	111.74	114.40	117.72	121.30	126.17	131.49	137.16	143.10	149.26	155.64	162.42	175.73	182.89	189.64	196.40	203.20	210.00	216.79	223.56	230.36	237.14	243.91
68-81	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76	6.76	7.48	28.65	59.49	80.62	99.97	118.25	135.72	152.46	168.47	183.92	199.01	213.34	227.51
68-116	160.65	163.18	166.48	169.80	173.12	176.46	179.81	183.17	186.54	189.95	193.39	198.07	201.45	204.83	208.76	212.32	215.88	219.44	223.00	226.56	230.11	233.67
69-70	75.21	78.27	81.35	84.36	87.56	90.77	94.00	97.30	100.59	103.97	107.59	111.55	115.09	118.35	121.57	124.75	127.79	130.80	133.70	136.57	139.33	142.04
69-75	79.32	81.98	84.76	87.59	90.50	93.48	96.56	99.73	102.95	106.24	109.74	114.13	118.36	122.65	127.06	131.67	136.56	141.76	146.55	150.43	154.36	158.08
69-77	23.10	23.10	23.10	23.23	24.21	26.71	30.80	36.02	42.18	49.11	56.98	68.52	77.98	88.28	99.80	112.10	122.30	130.37	138.11	145.22	152.10	158.79
70-71	8.03	8.08	8.14	8.20	8.26	8.88	10.06	11.65	13.72	16.16	19.25	22.37	26.53	30.42	34.15	37.75	41.11	44.27	47.27	50.15	52.91	55.64
70-74	16.95	16.95	16.98	17.08	17.03	17.20	17.21	17.60	18.18	18.95	20.01	21.47	22.87	24.51	26.23	28.05	30.15	32.40	34.46	36.27	38.08	39.90
70-75	7.72	7.89	8.06	8.24	8.42	8.59	8.77	8.95	9.13	9.33	9.69	10.38	11.52	12.93	14.44	15.97	17.64	19.22	20.81	22.49	24.04	25.58
71-72	1.52	1.52	1.53	1.53	1.54	1.54	1.54	1.69	3.39	5.89	8.86	12.36	16.29	20.06	23.62	26.91	29.97	32.86	35.58	38.22	40.73	43.04
71-73	10.52	10.65	10.80	10.96	11.12	11.30	11.47	11.66	11.84	12.04	12.24	12.36	12.78	13.21	13.65	14.11	14.58	15.06	15.55	16.04	16.55	17.06
74-75	11.36	13.01	15.90	19.40	23.31	27.52	32.27	37.09	41.71	46.24	50.70	53.95	59.01	63.05	67.00	70.87	74.67	78.40	82.07	85.68	89.24	92.74
75-77	19.11	19.31	19.45	19.72	20.13	20.39	21.94	24.51	27.50	30.65	33.89	37.89	41.34	44.59	47.79	50.86	53.88	56.84	59.75	62.62	65.43	68.20
75-118	28.50	29.03	29.71	30.14	31.02	32.35	34.11	36.25	38.70	41.51	44.94	48.40	52.24	56.07	60.18	64.71	69.65	74.41	78.61	82.64	86.59	90.42
76-77	40.94	41.79	42.90	44.16	45.93	48.01	50.60	53.66	56.75	59.80	62.89	65.76	69.42	72.20	74.92	77.59	80.19	82.75	85.34	87.80	90.23	92.62
76-118	5.15	5.69	6.25	6.85	7.46	8.07	8.67	9.28	9.88	10.49	11.21	12.09	16.20	19.95	24.23	28.87	33.95	39.12	43.55	47.72	51.75	55.69
77-78	0.01	0.01	1.84	3.77	6.56	11.95	17.94	24.11	30.40	36.81	43.30	48.48	58.88	69.29	79.64	89.99	100.46	110.91	121.42	131.99	142.51	152.99
77-80	102.87	104.57	107.25	110.64	114.79	119.52	124.70	130.34	136.01	142.02	148.28	156.46	162.19	167.71	173.24	178.78	184.32	189.86	195.42	200.96	206.53	212.23
77-82	4.72	5.52	6.49	7.47	8.49	9.51	10.54	11.57	12.61	13.72	15.33	21.53	30.60	39.87	50.07	59.48	68.71	77.77	85.96	93.91	101.34	108.33
78-79	11.81	13.04	14.26	15.48	16.69	17.90	19.12	20.50	22.91	26.14	30.01	33.17	36.73	40.25	43.86	47.52	51.23	55.08	58.85	62.63	66.41	70.20
79-80	42.91	44.86	47.13	49.71	52.41	55.22	58.17	61.04	63.89	66.73	69.63	72.67	76.32	79.84	83.38	86.95	90.54	94.28	97.89	101.52	105.15	108.77
80-81	73.75	73.74	73.74	73.74	73.74	73.74	73.74	73.74	73.74	74.04	80.00	96.64	111.67	126.93	142.27	157.56	172.73	187.43	201.81	215.69	229.82	243.15
80-96	20.51	20.92	21.34	21.78	22.22	22.66	23.11	23.58	24.08	24.87	26.76	30.21	34.32	38.43	42.76	47.26	51.77	56.41	61.13	65.93	70.67	75.33
80-97	25.59	26.16	26.73	27.30	27.87	28.46	29.09	29.69	30.65	32.35	34.99	38.99	43.43	47.70	52.17	56.74	61.46	66.11	70.84	75.65	80.47	85.16
80-98	12.21	12.42	12.62	12.81	13.01	13.22	13.62	14.75	17.62	21.54	26.49	33.87	39.81	45.12	50.42	55.70	60.95	66.17	71.28	76.36	81.36	86.36
80-99	11.91	11.91	11.91	11.91	11.92	11.93	11.91	11.91	12.18	14.22	18.04	24.57	30.10	34.97	39.81	44.55	49.20	53.75	58.17	62.45	66.62	70.70

Tabela B.8 – Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência aparente (MVA) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo AC SFPF para a rede de 118 barramentos do Capítulo 3, secção 3.10: ramo 82-83 a ramo 114-115

Sik	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
82-83	0.01	0.01	1.19	3.50	5.91	8.72	13.00	19.86	28.32	37.82	48.79	57.54	66.68	74.70	82.36	89.82	97.09	104.20	111.16	118.25	124.91	131.45
82-96	0.02	0.01	0.30	1.31	2.36	3.43	4.51	5.59	6.72	7.97	10.15	13.90	18.64	23.54	28.53	33.55	38.59	43.62	48.65	53.67	58.68	63.68
83-84	1.61	2.69	3.81	5.09	6.62	9.06	12.15	15.54	19.05	22.79	27.03	30.57	34.30	37.55	40.70	43.77	46.74	49.63	52.46	55.22	57.93	60.59
83-85	0.97	2.66	5.27	8.95	13.15	17.60	22.15	26.80	31.50	36.40	41.97	46.83	51.92	56.32	60.56	64.69	68.73	72.65	76.48	80.22	83.88	87.40
84-85	0.92	4.07	7.26	10.53	13.91	17.32	20.81	24.32	27.90	31.58	35.66	39.26	43.51	47.06	50.56	54.02	57.43	60.79	64.09	67.32	70.38	73.36
85-86	8.25	9.20	10.18	11.17	12.18	13.19	14.21	15.24	16.27	17.31	18.35	19.01	21.07	23.14	25.22	27.32	29.41	31.52	33.63	35.75	37.87	40.00
85-88	4.72	8.68	12.63	16.79	21.03	25.35	29.74	34.22	38.79	43.48	48.79	53.17	57.88	61.89	65.74	69.53	73.25	76.90	80.49	84.00	87.39	90.65
85-89	40.24	42.94	45.67	48.43	51.21	54.02	56.85	59.70	62.64	65.58	69.01	73.44	77.00	80.05	82.96	85.81	88.59	91.31	93.96	96.54	99.00	101.32
86-87	13.77	13.94	14.12	14.29	14.47	14.64	14.82	14.99	15.17	15.35	15.52	15.67	15.93	16.12	16.31	16.50	16.69	16.88	17.07	17.26	17.45	17.63
88-89	58.09	62.82	67.26	71.43	75.35	79.03	82.47	85.41	88.50	91.80	96.41	101.48	106.37	109.31	111.90	114.38	116.76	119.00	121.18	123.31	125.38	127.42
89-90	123.70	127.98	132.26	136.54	140.82	145.10	149.39	153.67	157.96	162.26	167.62	171.04	176.52	180.92	185.33	189.88	194.24	198.57	202.88	207.18	211.47	215.75
89-92	200.02	205.64	211.33	217.08	222.91	228.82	234.80	240.95	247.25	253.58	261.81	268.69	275.88	281.63	287.15	292.44	297.55	302.47	307.24	311.87	316.36	320.72
90-91	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.73	5.95	7.64	9.46	11.36	13.31	15.27	17.25	19.22	21.20	23.17
91-92	8.87	8.87	8.87	8.87	8.87	8.87	8.88	8.88	8.95	9.24	10.33	11.40	13.44	15.22	17.09	19.00	20.94	22.90	24.87	26.86	28.84	30.83
92-93	25.73	28.41	31.22	34.15	37.14	40.34	43.54	46.72	49.89	53.05	56.88	60.72	64.25	67.22	70.05	72.76	75.33	77.80	80.19	82.49	84.72	86.90
92-94	22.30	24.92	27.61	30.38	33.23	36.16	39.28	42.42	45.54	48.66	52.48	56.22	59.82	62.80	65.61	68.26	70.78	73.20	75.53	77.78	79.96	82.08
92-100	14.48	15.91	17.52	19.25	21.08	22.99	24.98	27.04	29.15	31.41	34.18	36.97	39.42	41.56	43.64	45.66	47.63	49.55	51.43	53.27	55.07	56.84
92-102	18.19	20.56	22.97	25.39	27.83	30.30	32.80	35.36	38.02	40.78	43.80	47.07	49.67	52.04	54.34	56.58	58.77	60.91	63.00	65.05	67.07	69.05
93-94	16.22	18.84	21.54	24.46	27.50	30.56	33.64	36.72	39.87	43.03	46.86	50.73	54.37	57.41	60.29	63.01	65.61	68.10	70.51	72.83	75.09	77.29
94-95	11.57	12.30	13.11	14.29	16.53	19.49	22.75	26.36	30.26	34.21	38.59	45.15	49.66	53.98	58.26	62.48	66.63	70.72	74.76	78.73	82.66	86.54
94-96	0.00	0.00	0.01	0.44	0.93	1.43	2.25	4.48	8.07	12.75	18.26	25.94	31.38	36.32	41.16	45.91	50.58	55.12	59.57	63.93	68.22	72.43
94-100	38.58	39.45	40.33	41.20	42.08	42.98	43.88	44.88	46.13	47.56	49.26	52.43	55.10	58.05	61.20	64.54	68.06	71.75	75.58	79.78	83.90	88.10
95-96	13.21	13.96	14.73	15.49	16.26	17.00	17.77	18.52	19.28	20.05	20.93	22.20	25.18	27.75	30.71	33.92	37.28	40.72	44.16	47.63	51.11	54.60
96-97	17.33	17.79	18.25	18.73	19.20	19.67	20.15	20.63	21.12	21.63	22.25	22.95	27.26	30.71	34.59	38.69	42.89	47.24	51.74	56.33	60.86	65.40
98-100	0.00	0.03	0.15	0.26	0.38	0.49	0.61	0.73	0.84	0.96	2.13	9.63	15.24	20.31	25.25	30.05	34.74	39.34	43.70	48.06	51.91	55.66
99-100	9.57	9.58	9.58	9.59	9.60	9.57	9.57	9.63	11.06	14.52	19.59	26.73	32.16	37.21	42.14	47.01	51.79	56.49	60.67	64.62	68.44	71.84
100-101	15.10	15.50	16.07	16.76	17.45	18.40	19.60	21.05	22.80	24.81	27.00	29.76	31.87	33.91	35.94	37.96	39.96	41.93	43.89	45.83	47.75	49.66
100-103	83.61	87.30	91.00	94.70	98.42	102.14	105.88	109.62	113.37	117.13	120.90	126.60	130.39	134.18	137.97	141.77	145.58	149.39	153.21	157.03	160.86	164.70
100-104	43.24	44.50	45.77	47.05	48.34	49.63	50.94	52.25	53.58	54.90	56.24	58.13	59.48	60.83	62.19	63.56	64.92	66.29	67.67	69.05	70.43	71.81
100-106	46.84	48.14	49.44	50.75	52.07	53.40	54.74	56.08	57.43	58.79	60.15	62.05	63.42	64.80	66.18	67.57	68.95	70.34	71.73	73.13	74.52	75.92
101-102	13.48	15.82	18.17	20.55	22.94	25.36	27.83	30.35	32.95	35.64	38.67	41.85	44.46	46.81	49.09	51.30	53.46	55.57	57.63	59.65	61.63	63.57
103-104	29.85	30.32	30.80	31.28	31.78	32.28	32.79	33.31	33.83	34.36	34.90	35.69	36.24	36.79	37.35	37.92	38.48	39.06	39.63	40.21	40.79	41.38
103-105	37.18	37.89	38.60	39.33	40.07	40.81	41.56	42.33	43.10	43.87	44.66	45.78	46.58	47.38	48.19	49.01	49.83	50.65	51.48	52.31	53.15	53.98
103-110	44.29	45.82	47.37	48.93	50.50	52.08	53.66	55.25	56.86	58.46	60.08	62.27	63.90	65.53	67.17	68.81	70.46	72.11	73.76	75.42	77.08	78.75
104-105	31.04	32.62	34.22	35.84	37.47	39.11	40.77	42.44	44.12	45.81	47.51	49.81	51.52	53.24	54.97	56.70	58.44	60.18	61.92	63.67	65.41	67.16
105-106	2.16	2.58	3.00	3.43	3.85	4.31	4.99	5.84	6.81	7.84	8.92	10.45	11.58	12.73	13.88	15.05	16.22	17.39	18.56	19.74	20.92	22.10
105-107	19.65	20.33	21.00	21.67	22.34	23.02	23.69	24.37	25.05	25.72	26.40	27.32	28.00	28.68	29.36	30.04	30.72	31.40	32.08	32.77	33.45	34.13
105-108	10.53	11.99	13.46	14.94	16.42	17.91	19.40	20.90	22.40	23.90	25.40	27.44	28.95	30.46	31.98	33.49	35.01	36.52	38.04	39.56	41.09	42.61
106-107	17.55	18.17	18.80	19.43	20.06	20.69	21.32	21.95	22.58	23.21	23.84	24.70	25.33	25.97	26.60	27.24	27.87	28.51	29.14	29.78	30.41	31.05
108-109	8.70	10.13	11.57	13.02	14.48	15.95	17.42	18.90	20.38	21.87	23.35	25.37	26.86	28.36	29.85	31.35	32.85	34.35	35.85	37.35	38.86	40.36
109-110	7.67	8.37	9.16	10.01	11.00	12.07	13.22	14.43	15.68	16.96	18.27	20.07	21.43	22.79	24.17	25.56	26.96	28.36	29.77	31.19	32.61	34.04
110-111	34.32	34.45	34.58	34.71	34.84	34.97	35.10	35.23	35.37	35.50	35.63	35.80	35.94	36.07	36.20	36.33	36.46	36.60	36.73	36.86	36.99	37.12
110-112	61.12	62.50	63.88	65.27	66.65	68.04	69.42	70.81	72.20	73.59	74.98	76.83	78.22	79.62	81.01	82.40	83.80	85.19	86.59	87.99	89.38	90.78
114-115	0.04	0.04	0.03	0.00	0.07	0.00	0.02	0.16	0.12	0.30	0.88	1.93	2.85	3.76	4.72	5.63	6.53	7.43	8.34	9.24	10.14	11.04

Tabela B.9 – Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência aparente (MVA) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo AC CFPF para a rede de 118 barramentos do Capítulo 3, secção 3.10: ramo 1-2 a ramo 27-28

Sik	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
1-2	14.52	14.57	14.63	14.68	14.74	14.88	15.13	15.50	16.00	16.71	17.67	18.27	18.85	18.85	18.85	18.85	18.85	18.85	18.85	18.85	18.85	18.85
1-3	21.86	22.38	23.40	24.85	26.54	28.45	30.53	32.76	35.20	38.30	41.60	42.89	43.83	43.83	43.83	43.83	43.83	43.83	43.83	43.83	43.83	43.83
2-12	25.51	26.28	27.21	28.23	29.34	30.51	31.74	33.03	34.37	35.85	37.58	38.66	39.51	39.51	39.51	39.51	39.51	39.51	39.51	39.51	39.51	39.51
3-12	45.76	47.86	49.99	52.17	54.37	56.60	58.86	61.18	63.54	65.94	68.77	70.49	71.63	71.63	71.63	71.63	71.63	71.63	71.63	71.63	71.63	71.63
3-5	13.69	13.73	13.81	13.93	14.05	14.17	14.31	14.51	14.62	15.00	15.59	16.01	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46	16.46
4-5	69.92	72.58	75.32	78.07	80.87	83.88	87.48	91.29	95.28	100.14	105.45	107.83	109.33	109.33	109.33	109.33	109.33	109.33	109.33	109.33	109.33	109.33
4-11	32.94	35.81	38.71	41.63	44.60	47.59	50.59	53.60	56.61	59.76	63.29	65.16	68.51	70.57	72.38	74.19	76.00	77.44	77.76	78.07	78.39	78.70
5-6	56.26	59.04	61.85	64.68	67.63	70.61	73.61	76.62	79.64	82.81	87.31	89.81	91.34	91.34	91.34	91.34	91.34	91.34	91.34	91.34	91.34	91.34
5-8	305.41	309.13	312.86	316.61	320.36	324.11	327.88	332.67	337.84	343.35	356.65	364.78	369.61	369.61	369.61	369.61	369.61	369.61	369.61	369.61	369.61	369.61
5-11	45.57	48.46	51.38	54.36	57.35	60.35	63.34	66.38	69.44	72.59	76.29	78.27	81.73	83.66	85.36	87.05	88.73	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
6-7	0.87	1.12	1.37	3.81	7.89	12.13	16.41	20.75	25.15	29.62	34.62	37.09	40.44	41.90	43.36	44.83	46.29	47.75	49.21	50.67	52.13	53.59
7-12	1.06	1.20	1.33	1.47	1.60	2.02	2.75	4.14	7.50	11.32	16.43	19.00	20.58	20.58	20.58	20.58	20.58	20.58	20.58	20.58	20.58	20.58
8-9	430.14	431.60	433.06	434.52	435.98	437.44	438.91	440.37	441.84	443.31	446.61	452.72	454.37	454.37	454.37	454.37	454.37	454.37	454.37	454.37	454.37	454.37
8-30	34.32	36.75	39.43	42.31	45.37	48.56	51.87	55.26	58.72	62.24	73.34	85.40	92.15	92.15	92.15	92.15	92.15	92.15	92.15	92.15	92.15	92.15
9-10	424.04	425.68	427.32	428.97	430.61	432.25	433.89	435.53	437.17	438.81	442.51	449.30	451.15	451.15	451.15	451.15	451.15	451.15	451.15	451.15	451.15	451.15
11-12	18.47	19.96	21.50	23.08	24.67	26.43	29.03	32.05	35.90	40.92	47.11	51.10	53.63	53.63	53.63	53.63	53.63	53.63	53.63	53.63	53.63	53.63
11-13	11.67	12.27	13.29	14.49	16.42	18.78	21.46	24.36	27.44	30.71	35.56	38.23	42.99	46.43	49.56	52.53	55.42	58.23	61.04	63.86	66.68	69.51
12-14	5.11	5.37	5.63	5.89	6.17	6.43	7.02	8.37	10.23	12.41	17.01	19.99	24.66	27.21	29.53	31.62	33.53	35.37	37.20	39.02	40.80	42.59
12-16	0.98	1.43	1.90	2.37	2.87	3.38	3.89	4.41	4.93	5.47	7.43	9.97	11.92	11.92	11.92	11.92	11.92	11.92	11.92	11.92	11.92	11.92
12-117	16.44	16.85	17.25	17.66	18.07	18.48	18.89	19.30	19.71	20.12	20.54	21.09	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50	21.50
13-15	0.40	0.65	0.90	1.17	1.45	1.74	2.02	2.32	2.62	2.96	3.45	4.71	7.86	9.60	11.35	12.88	14.50	15.93	17.37	18.82	20.28	21.74
14-15	3.28	3.37	3.47	3.57	3.66	3.76	3.85	3.95	4.04	4.13	4.50	6.34	10.11	12.02	13.72	15.27	16.66	17.95	19.25	20.54	21.81	23.08
15-17	79.61	81.78	84.00	86.34	88.72	91.12	93.69	96.29	98.86	101.52	105.10	108.16	110.09	110.09	110.09	110.09	110.09	110.09	110.09	110.09	110.09	110.09
15-19	18.39	18.39	18.39	18.39	18.39	18.39	18.39	18.39	18.39	18.39	18.90	20.26	23.65	26.22	29.32	32.19	34.86	37.18	39.50	41.86	44.26	46.68
15-33	1.37	1.46	1.54	1.63	1.71	1.80	1.89	1.97	2.06	2.17	5.86	11.22	15.66	17.19	18.69	20.18	21.56	22.92	24.47	25.86	27.27	28.67
16-17	5.90	6.11	6.31	6.53	6.85	7.25	8.11	9.25	10.59	12.35	16.40	19.40	23.99	26.30	28.61	30.90	33.08	35.16	37.22	39.45	41.42	43.39
17-18	47.18	49.75	52.60	55.67	58.92	62.36	65.94	69.63	73.41	77.48	82.64	85.35	90.14	93.82	97.26	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
17-30	190.86	195.08	199.35	203.59	208.10	213.54	219.35	225.21	231.55	237.96	246.22	252.13	255.76	255.76	255.76	255.76	255.76	255.76	255.76	255.76	255.76	255.76
17-31	14.93	14.96	14.99	15.02	15.05	15.09	15.19	15.35	15.57	16.15	17.70	19.89	21.75	21.75	21.75	21.75	21.75	21.75	21.75	21.75	21.75	21.75
17-113	4.59	4.74	4.90	5.05	5.21	5.37	5.52	5.68	5.83	5.99	6.14	6.56	7.54	7.78	7.78	7.78	7.78	7.78	7.78	7.78	7.78	7.78
18-19	20.64	20.64	20.64	20.64	20.64	20.64	20.65	20.66	21.05	22.41	24.88	26.49	29.80	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
19-20	1.00	1.30	1.63	1.97	2.31	2.67	3.16	4.40	6.03	7.88	10.64	13.00	14.24	14.24	14.24	14.24	14.24	14.24	14.24	14.24	14.24	14.24
19-34	10.99	10.99	10.99	10.99	10.99	10.99	10.99	10.99	10.99	10.99	11.25	13.52	14.58	15.43	16.33	17.26	18.20	19.08	19.97	20.84	21.77	
20-21	15.27	16.35	17.47	18.62	19.77	20.92	22.06	23.22	24.47	25.94	27.97	30.09	31.05	31.05	31.05	31.05	31.05	31.05	31.05	31.05	31.05	31.05
21-22	30.08	30.91	31.92	33.01	34.11	35.20	36.30	37.39	38.55	39.88	41.86	43.90	44.91	44.91	44.91	44.91	44.91	44.91	44.91	44.91	44.91	44.91
22-23	41.25	42.04	42.84	43.73	44.76	45.87	46.99	48.10	49.28	50.54	52.60	54.74	55.79	55.79	55.79	55.79	55.79	55.79	55.79	55.79	55.79	55.79
23-24	10.16	10.28	10.40	10.54	10.70	10.86	11.02	11.17	11.33	11.58	12.09	15.25	18.28	18.28	18.28	18.28	18.28	18.28	18.28	18.28	18.28	18.28
23-25	144.82	146.04	147.28	148.50	149.74	151.10	152.65	154.40	156.65	159.43	162.79	166.48	168.50	168.50	168.50	168.50	168.50	168.50	168.50	168.50	168.50	168.50
23-32	72.70	73.86	75.33	76.98	78.67	80.55	82.43	84.33	86.07	88.34	91.29	95.00	97.37	97.37	97.37	97.37	97.37	97.37	97.37	97.37	97.37	97.37
24-70	3.09	3.09	3.09	3.09	3.10	3.12	3.17	3.27	3.42	3.60	5.41	8.40	10.93	11.21	11.35	11.35	11.35	11.35	11.35	11.35	11.35	11.35
24-72	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.57	3.58	3.57	3.72	5.33	5.79	6.03	6.03	6.03	6.03	6.03	6.03	6.03	6.03
25-26	72.76	73.90	75.03	76.17	77.31	78.45	79.60	80.74	81.89	83.10	88.02	97.62	101.09	101.09	101.09	101.09	101.09	101.09	101.09	101.09	101.09	101.09
25-27	128.34	129.72	131.33	132.98	134.67	136.39	138.14	139.87	141.65	143.47	145.49	147.64	149.01	149.01	149.01	149.01	149.01	149.01	149.01	149.01	149.01	149.01
26-30	201.05	202.48	204.04	205.64	207.23	208.83	210.58	212.34	214.27	216.51	221.13	226.79	228.90	228.90	228.90	228.90	228.90	228.90	228.90	228.90	228.90	228.90
27-28	20.69	21.70	22.73	23.76	24.79	25.85	26.91	28.03	29.21	30.56	32.04	33.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70	34.70

Tabela B.10 – Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência aparente (MVA) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo AC CFPF para a rede de 118 barramentos do Capítulo 3, seção 3.10: ramo 27-32 a ramo 54-59

Sik	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
27-32	6.13	6.42	6.73	7.07	7.44	7.83	8.24	8.72	9.66	10.69	11.94	13.28	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30	14.30
27-115	15.76	16.15	16.55	16.95	17.35	17.75	18.15	18.56	19.13	19.91	20.80	21.83	22.58	22.58	22.58	22.58	22.58	22.58	22.58	22.58	22.58	22.58
28-29	7.76	8.36	8.98	9.61	10.25	10.90	11.65	12.44	13.45	14.71	16.18	17.77	18.70	18.70	18.70	18.70	18.70	18.70	18.70	18.70	18.70	18.70
29-31	8.01	8.26	8.51	8.78	9.07	9.38	9.70	10.03	10.38	10.93	11.62	12.51	13.44	13.54	13.54	13.54	13.54	13.54	13.54	13.54	13.54	13.54
30-38	21.29	22.26	23.29	24.57	26.16	28.15	30.44	33.12	36.07	40.81	55.85	74.69	84.09	84.09	84.09	84.09	84.09	84.09	84.09	84.09	84.09	84.09
31-32	14.25	15.62	16.74	18.15	19.58	21.09	22.68	24.32	26.20	28.44	31.12	33.54	34.94	34.94	34.94	34.94	34.94	34.94	34.94	34.94	34.94	34.94
32-113	16.16	16.19	16.22	16.25	16.28	16.31	16.35	16.40	16.46	16.73	17.61	19.00	20.51	21.38	21.55	21.71	21.87	22.03	22.19	22.35	22.51	22.66
32-114	5.34	5.66	5.97	6.28	6.59	6.90	7.22	7.53	7.84	8.16	8.98	10.10	11.07	11.30	11.47	11.63	11.80	11.96	12.12	12.28	12.44	12.60
33-37	12.32	12.56	12.80	13.04	13.30	13.58	13.88	14.24	14.60	15.24	17.25	20.79	23.68	23.68	23.68	23.68	23.68	23.68	23.68	23.68	23.68	23.68
34-36	16.96	17.94	18.99	20.11	21.29	22.52	23.80	25.11	26.53	28.02	30.02	31.16	32.13	32.13	32.13	32.13	32.13	32.13	32.13	32.13	32.13	32.13
34-37	72.79	74.82	77.06	79.47	82.00	84.69	87.77	91.02	94.55	98.35	102.63	105.64	107.94	107.94	107.94	107.94	107.94	107.94	107.94	107.94	107.94	107.94
34-43	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.34	0.68	1.03	1.39	1.75	3.73	6.54	6.54	6.54	6.54	6.54	6.54	6.54	6.54	6.54	6.54
35-36	1.38	1.56	1.74	1.93	2.12	2.33	2.53	2.77	3.08	3.41	3.86	4.38	5.28	6.32	7.46	8.67	9.93	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
35-37	24.46	25.35	26.27	27.23	28.23	29.27	30.42	31.65	32.91	34.35	35.83	36.67	37.87	38.16	38.44	38.71	38.98	39.25	39.52	39.80	40.06	40.09
37-38	206.47	211.48	216.82	222.32	227.98	233.70	239.46	245.28	251.20	257.63	265.27	271.87	275.98	275.98	275.98	275.98	275.98	275.98	275.98	275.98	275.98	275.98
37-39	29.25	31.10	33.14	35.22	37.31	39.42	41.51	43.65	46.00	48.59	52.44	57.50	60.37	60.37	60.37	60.37	60.37	60.37	60.37	60.37	60.37	60.37
37-40	22.52	24.20	25.89	27.57	29.25	30.94	32.61	34.27	36.21	38.36	41.76	46.58	49.24	49.24	49.24	49.24	49.24	49.24	49.24	49.24	49.24	49.24
38-65	132.32	135.26	138.48	141.67	145.40	149.19	153.23	157.32	161.65	167.74	181.68	198.71	205.34	205.34	205.34	205.34	205.34	205.34	205.34	205.34	205.34	205.34
39-40	1.78	3.13	4.75	6.80	9.01	11.28	13.58	15.90	18.52	21.38	25.72	30.85	33.86	33.86	33.86	33.86	33.86	33.86	33.86	33.86	33.86	33.86
40-41	5.71	6.24	6.77	7.30	7.83	8.37	8.90	9.43	9.97	10.50	13.26	17.78	20.79	20.79	20.79	20.79	20.79	20.79	20.79	20.79	20.79	20.79
40-42	9.71	9.71	9.71	9.72	9.73	9.73	9.79	9.87	9.98	10.31	12.09	15.01	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97	16.97
41-42	14.05	14.41	14.79	15.19	15.61	16.05	16.51	16.99	17.48	18.37	21.16	24.77	26.90	26.90	26.90	26.90	26.90	26.90	26.90	26.90	26.90	26.90
42-49	89.71	92.57	95.45	98.33	101.22	104.20	107.55	110.91	114.55	119.21	126.15	134.12	137.61	137.61	137.61	137.61	137.61	137.61	137.61	137.61	137.61	137.61
43-44	8.02	8.37	8.72	9.08	9.45	9.81	10.17	10.53	10.90	11.42	14.59	18.73	20.76	20.76	20.76	20.76	20.76	20.76	20.76	20.76	20.76	20.76
44-45	20.79	21.44	22.10	22.76	23.42	24.09	24.75	25.43	26.10	27.29	30.93	35.51	37.71	37.71	37.71	37.71	37.71	37.71	37.71	37.71	37.71	37.71
45-46	23.88	24.83	25.78	26.75	27.72	28.72	29.74	30.78	31.90	33.29	35.27	37.75	39.10	39.10	39.10	39.10	39.10	39.10	39.10	39.10	39.10	39.10
45-49	36.85	37.78	38.71	39.66	40.62	41.60	42.58	43.63	44.86	46.21	48.31	51.18	52.68	52.68	52.68	52.68	52.68	52.68	52.68	52.68	52.68	52.68
46-47	20.79	21.66	22.53	23.40	24.28	25.19	26.12	27.12	28.19	29.28	30.38	31.87	32.89	32.89	32.89	32.89	32.89	32.89	32.89	32.89	32.89	32.89
46-48	10.77	11.10	11.44	11.81	12.19	12.60	13.03	13.48	14.00	14.59	15.28	16.47	17.25	17.25	17.25	17.25	17.25	17.25	17.25	17.25	17.25	17.25
47-49	11.18	11.41	11.65	11.86	12.10	12.32	12.57	12.80	13.05	13.33	13.71	15.62	17.41	17.82	17.82	17.82	17.82	17.82	17.82	17.82	17.82	17.82
47-69	40.98	42.01	43.04	43.67	44.70	45.80	46.90	48.16	49.60	51.31	54.38	59.78	61.81	61.81	61.81	61.81	61.81	61.81	61.81	61.81	61.81	61.81
48-49	25.27	26.07	26.88	27.70	28.52	29.34	30.18	31.03	31.92	32.95	34.12	35.96	37.10	37.10	37.10	37.10	37.10	37.10	37.10	37.10	37.10	37.10
49-50	40.82	41.99	43.17	44.40	45.66	46.95	48.25	49.58	51.01	52.52	54.11	56.48	58.10	58.10	58.10	58.10	58.10	58.10	58.10	58.10	58.10	58.10
49-51	52.77	54.03	55.44	56.88	58.36	59.87	61.40	62.95	64.57	66.37	68.24	71.12	72.99	72.99	72.99	72.99	72.99	72.99	72.99	72.99	72.99	72.99
49-54	55.31	57.10	59.02	60.98	62.98	65.04	67.07	69.31	71.70	74.27	77.11	81.52	84.17	84.17	84.17	84.17	84.17	84.17	84.17	84.17	84.17	84.17
49-66	208.08	212.10	216.22	220.43	224.73	229.12	233.61	238.23	242.97	249.97	258.52	270.93	276.88	276.88	276.88	276.88	276.88	276.88	276.88	276.88	276.88	276.88
49-69	33.05	33.82	34.67	35.51	36.23	37.19	38.10	39.21	40.50	42.03	45.01	50.37	52.32	52.32	52.32	52.32	52.32	52.32	52.32	52.32	52.32	52.32
50-57	25.12	26.02	26.92	27.86	28.86	29.91	30.98	32.09	33.30	34.59	35.94	38.08	39.46	39.47	39.47	39.47	39.47	39.47	39.47	39.47	39.47	39.47
51-52	20.31	21.08	21.86	22.65	23.46	24.27	25.09	25.92	26.78	27.66	28.57	29.89	30.78	30.78	30.78	30.78	30.78	30.78	30.78	30.78	30.78	30.78
51-58	9.50	10.02	10.60	11.24	11.95	12.72	13.59	14.53	15.54	16.65	18.00	20.09	21.41	21.41	21.41	21.41	21.41	21.41	21.41	21.41	21.41	21.41
52-53	3.72	4.18	4.64	5.10	5.71	6.36	7.03	7.71	8.43	9.18	9.97	11.16	11.94	11.94	11.94	11.94	11.94	11.94	11.94	11.94	11.94	11.94
53-54	8.33	8.75	9.17	9.59	10.01	10.44	10.87	11.31	11.75	12.28	13.20	14.49	15.46	15.49	15.49	15.49	15.49	15.49	15.49	15.49	15.49	15.49
54-55	3.24	3.40	3.62	3.86	4.14	4.44	4.76	5.10	5.48	6.07	6.69	7.74	8.42	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43	8.43
54-56	9.29	9.29	9.29	9.29	9.30	9.40	9.95	10.87	12.18	14.33	16.85	21.24	24.08	24.16	24.16	24.16	24.16	24.16	24.16	24.16	24.16	24.16
54-59	20.44	21.15	21.90	22.67	23.46	24.27	25.14	26.02	27.21	28.56	30.11	32.48	33.91	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92	33.92

Tabela B.11 – Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência aparente (MVA) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo AC CFPF para a rede de 118 barramentos do Capítulo 3, secção 3.10: ramo 55-56 a ramo 80-99

Sik	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
55-56	13.31	13.72	14.19	14.71	15.30	15.88	16.63	17.41	18.40	19.57	21.04	23.33	25.00	25.11	25.11	25.11	25.11	25.11	25.11	25.11	25.11	25.11
55-59	24.07	24.85	25.67	26.51	27.37	28.26	29.18	30.13	31.35	32.73	34.30	36.63	38.11	38.11	38.11	38.11	38.11	38.11	38.11	38.11	38.11	38.11
56-57	16.06	16.46	16.95	17.51	18.15	18.88	19.70	20.57	21.54	22.63	23.81	25.61	26.87	26.99	26.99	26.99	26.99	26.99	26.99	26.99	26.99	26.99
56-58	3.19	3.47	3.74	4.01	4.28	4.55	4.84	5.15	5.41	5.92	6.82	8.49	9.73	9.84	9.84	9.84	9.84	9.84	9.84	9.84	9.84	9.84
56-59	38.47	39.78	41.14	42.55	43.99	45.48	46.99	48.64	50.71	53.10	55.73	59.96	62.44	62.45	62.45	62.45	62.45	62.45	62.45	62.45	62.45	62.45
59-60	20.96	22.60	24.32	26.06	27.87	29.82	31.98	34.18	36.70	39.26	41.84	45.07	46.91	46.91	46.91	46.91	46.91	46.91	46.91	46.91	46.91	46.91
59-61	33.15	34.54	35.96	37.43	38.94	40.52	42.23	44.00	46.10	48.20	50.35	53.57	55.32	55.33	55.33	55.33	55.33	55.33	55.33	55.33	55.33	55.33
59-63	125.21	128.37	131.65	135.01	138.44	141.95	145.40	149.00	152.88	157.24	162.01	170.15	174.63	174.63	174.63	174.63	174.63	174.63	174.63	174.63	174.63	174.63
60-61	78.95	81.79	84.66	87.62	90.58	93.53	96.49	99.44	102.69	106.46	110.26	114.55	120.78	124.68	128.43	132.17	135.90	139.63	143.32	146.93	150.51	153.77
60-62	7.56	7.71	7.84	7.98	8.12	8.26	8.41	8.65	9.26	10.04	11.35	13.03	15.19	17.10	19.02	20.89	22.62	24.37	26.11	27.80	29.46	30.56
61-62	14.02	14.95	15.98	17.04	18.01	19.04	20.29	21.43	22.97	25.02	27.24	30.75	33.28	35.62	37.89	39.86	41.82	43.81	45.81	47.83	49.87	50.00
61-64	16.49	16.52	16.54	16.66	17.18	18.09	19.36	20.83	22.85	26.19	30.05	37.34	40.98	40.98	40.98	40.98	40.98	40.98	40.98	40.98	40.98	40.98
62-66	31.20	31.90	32.65	33.42	34.23	35.07	35.93	36.83	37.82	38.90	40.05	41.88	42.87	42.87	42.87	42.87	42.87	42.87	42.87	42.87	42.87	42.87
62-67	16.13	16.59	16.97	17.59	18.37	19.35	20.50	21.81	23.41	25.22	27.25	29.26	30.43	30.43	30.43	30.43	30.43	30.43	30.43	30.43	30.43	30.43
63-64	125.33	128.51	131.76	135.09	138.51	141.93	145.48	149.03	152.97	157.25	162.00	170.15	174.63	174.63	174.63	174.63	174.63	174.63	174.63	174.63	174.63	174.63
64-65	128.23	132.94	137.73	142.60	147.54	152.55	157.63	162.78	168.28	177.26	186.52	202.67	210.90	210.90	210.90	210.90	210.90	210.90	210.90	210.90	210.90	210.90
65-66	72.24	72.24	72.24	72.24	72.24	72.24	72.24	72.24	72.24	72.24	72.24	74.53	77.97	78.66	78.66	78.66	78.66	78.66	78.66	78.66	78.66	78.66
65-68	21.21	21.20	21.20	21.20	21.20	21.20	21.20	21.20	21.20	21.22	21.24	21.25	28.78	37.00	44.22	50.70	51.99	51.99	51.99	51.99	51.99	51.99
66-67	37.05	38.68	40.37	42.12	43.90	45.69	47.50	49.34	51.26	53.26	55.28	57.78	60.41	61.95	63.46	64.97	66.48	67.99	69.51	71.03	72.00	72.00
68-69	140.78	141.95	143.14	144.33	145.82	147.38	149.00	150.67	152.35	155.89	162.44	175.73	182.00	182.00	182.00	182.00	182.00	182.00	182.00	182.00	182.00	182.00
68-81	6.75	6.75	6.75	6.74	6.74	6.73	6.72	6.77	8.29	11.25	28.65	59.49	74.70	74.70	74.70	74.70	74.70	74.70	74.70	74.70	74.70	74.70
68-116	160.65	163.42	166.70	169.99	173.28	176.59	179.90	183.25	186.62	190.00	193.40	198.01	201.38	201.49	201.49	201.49	201.49	201.49	201.49	201.49	201.49	201.49
69-70	84.82	86.79	88.84	90.88	92.92	94.97	97.03	99.12	101.52	104.09	107.61	111.52	114.07	114.07	114.07	114.07	114.07	114.07	114.07	114.07	114.07	114.07
69-75	89.35	90.90	92.45	94.00	95.56	97.12	98.68	100.82	103.39	106.32	109.77	114.11	117.30	117.30	117.30	117.30	117.30	117.30	117.30	117.30	117.30	117.30
69-77	38.25	39.21	40.18	41.18	42.24	43.32	44.41	45.58	46.81	49.71	56.98	68.53	75.25	75.25	75.25	75.25	75.25	75.25	75.25	75.25	75.25	75.25
70-71	10.21	10.74	11.32	11.96	12.63	13.33	14.06	14.81	15.58	16.37	19.29	22.41	24.44	24.44	24.44	24.44	24.44	24.44	24.44	24.44	24.44	24.44
70-74	16.95	16.96	17.02	17.12	17.12	17.31	17.54	17.89	18.34	19.03	19.99	21.49	22.94	22.94	22.94	22.94	22.94	22.94	22.94	22.94	22.94	22.94
70-75	7.97	8.11	8.25	8.39	8.53	8.67	8.82	8.98	9.15	9.34	9.67	10.35	11.37	12.36	13.27	14.15	15.02	15.94	16.97	17.92	18.87	19.84
71-72	1.60	1.82	2.19	2.66	3.19	3.75	4.33	4.93	5.54	6.17	8.87	12.37	14.46	14.46	14.46	14.46	14.46	14.46	14.46	14.46	14.46	14.46
71-73	10.52	10.65	10.80	10.96	11.12	11.30	11.47	11.66	11.84	12.04	12.24	12.37	12.47	12.47	12.47	12.47	12.47	12.47	12.47	12.47	12.47	12.47
74-75	17.33	20.13	23.07	26.09	29.18	32.41	35.75	39.14	42.58	46.27	50.69	53.98	56.02	56.02	56.02	56.02	56.02	56.02	56.02	56.02	56.02	56.02
75-77	23.15	23.89	24.67	25.48	26.31	27.17	28.06	29.01	29.99	31.02	33.91	37.88	40.29	40.29	40.29	40.29	40.29	40.29	40.29	40.29	40.29	40.29
75-118	31.13	31.77	32.41	33.05	34.08	35.29	36.65	38.13	39.70	41.54	44.94	48.39	51.11	51.11	51.11	51.11	51.11	51.11	51.11	51.11	51.11	51.11
76-77	48.72	49.84	51.01	52.20	53.43	54.70	56.01	57.35	58.72	60.11	62.89	66.44	68.77	68.77	68.77	68.77	68.77	68.77	68.77	68.77	68.77	68.77
76-118	5.64	6.16	6.69	7.21	7.73	8.25	8.76	9.33	9.90	10.50	11.34	12.82	15.29	15.29	15.29	15.29	15.29	15.29	15.29	15.29	15.29	15.29
77-78	5.44	8.73	12.05	15.40	18.81	22.30	25.81	29.36	33.09	37.14	43.33	48.47	51.48	51.48	51.48	51.48	51.48	51.48	51.48	51.48	51.48	51.48
77-80	109.80	112.00	114.52	117.35	120.48	123.93	127.68	131.70	136.45	142.05	148.29	156.46	160.55	160.55	160.55	160.55	160.55	160.55	160.55	160.55	160.55	160.55
77-82	4.57	5.57	6.57	7.57	8.58	9.59	10.62	11.65	12.69	13.75	15.32	21.99	28.31	28.31	28.31	28.31	28.31	28.31	28.31	28.31	28.31	28.31
78-79	14.07	14.64	15.20	15.77	16.70	17.90	19.11	20.60	23.01	26.15	30.01	33.18	35.08	35.08	35.08	35.08	35.08	35.08	35.08	35.08	35.08	35.08
79-80	47.53	49.32	51.19	53.17	55.25	57.38	59.56	61.71	64.12	66.72	69.62	72.72	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38	74.38
80-81	73.73	73.73	73.75	73.78	73.82	73.87	73.92	73.88	74.19	74.74	80.00	96.65	107.22	107.22	107.22	107.22	107.22	107.22	107.22	107.22	107.22	107.22
80-96	20.36	20.83	21.30	21.77	22.25	22.74	23.23	23.80	24.41	25.07	26.76	30.21	33.36	33.36	33.36	33.36	33.36	33.36	33.36	33.36	33.36	33.36
80-97	25.52	26.18	26.86	27.56	28.31	29.10	29.93	30.78	31.68	32.68	34.99	39.01	42.32	42.32	42.32	42.32	42.32	42.32	42.32	42.32	42.32	42.32
80-98	17.39	17.93	18.48	19.04	19.60	20.16	20.73	21.30	21.87	22.45	26.49	33.86	38.28	38.28	38.28	38.28	38.28	38.28	38.28	38.28	38.28	38.28
80-99	12.75	12.93	13.12	13.33	13.55	13.79	14.03	14.29	14.56	14.85	18.04	24.58	28.54	28.54	28.54	28.54	28.54	28.54	28.54	28.54	28.54	28.54

Tabela B.12 – Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência aparente (MVA) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo AC CFPF para a rede de 118 barramentos do Capítulo 3, secção 3.10: ramo 82-83 a ramo 114-115

Sik	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
82-83	8.81	10.09	11.88	14.11	17.54	21.49	25.72	30.18	34.80	39.83	48.79	57.52	62.42	62.42	62.42	62.42	62.42	62.42	62.42	62.42	62.42	62.42
82-96	0.02	0.01	0.28	1.34	2.41	3.48	4.56	5.64	6.72	7.98	10.15	13.92	16.80	16.80	16.80	16.80	16.80	16.80	16.80	16.80	16.80	16.80
83-84	9.34	10.70	12.14	13.65	15.21	16.79	18.42	20.07	21.80	23.62	27.03	30.60	32.59	32.59	32.59	32.59	32.59	32.59	32.59	32.59	32.59	32.59
83-85	19.74	21.68	23.63	25.58	27.53	29.48	31.44	33.38	35.43	37.57	41.98	46.89	49.60	49.60	49.60	49.60	49.60	49.60	49.60	49.60	49.60	49.60
84-85	18.03	19.55	21.08	22.62	24.17	25.73	27.30	28.90	30.59	32.36	35.64	39.26	41.28	41.28	41.28	41.28	41.28	41.28	41.28	41.28	41.28	41.28
85-86	8.25	9.20	10.18	11.17	12.18	13.19	14.21	15.24	16.27	17.31	18.35	19.01	19.45	19.45	19.45	19.45	19.45	19.45	19.45	19.45	19.45	19.45
85-88	23.03	25.01	27.07	29.20	31.38	33.58	35.91	38.60	41.34	44.22	48.72	53.24	57.69	59.44	61.11	62.78	64.45	66.12	67.78	69.45	71.11	72.77
85-89	53.12	54.40	55.69	57.03	58.44	59.87	61.35	62.87	64.42	66.03	69.00	73.47	76.81	77.99	78.89	79.78	80.66	81.55	82.43	83.31	84.19	85.07
86-87	13.77	13.94	14.12	14.29	14.47	14.64	14.82	14.99	15.17	15.35	15.52	15.67	15.81	15.89	15.96	16.03	16.11	16.18	16.25	16.32	16.40	16.40
88-89	68.77	71.08	73.40	76.02	78.66	81.32	83.98	86.69	89.44	92.28	96.41	101.51	103.80	103.80	103.80	103.80	103.80	103.80	103.80	103.80	103.80	103.80
89-90	124.57	128.06	132.35	136.63	140.90	145.17	149.44	153.70	157.95	162.21	167.60	171.02	173.81	173.81	173.81	173.81	173.81	173.81	173.81	173.81	173.81	173.81
89-92	226.51	229.25	232.02	234.82	237.64	240.61	244.01	247.46	251.03	254.81	261.83	268.53	275.83	279.41	282.59	285.25	287.71	290.13	292.54	295.10	296.91	298.66
90-91	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.74	6.01	7.27	8.70	10.19	11.74	13.48	15.07	16.67	18.21	19.78
91-92	8.87	8.87	8.87	8.87	8.87	8.87	8.88	8.88	8.95	9.24	10.33	11.46	13.00	13.55	14.03	14.52	15.01	15.49	15.95	16.40	16.86	17.32
92-93	40.42	41.86	43.30	44.75	46.21	47.67	49.13	50.62	52.13	53.67	56.88	60.72	64.09	66.14	67.48	68.02	68.56	69.08	69.57	70.07	70.56	71.03
92-94	37.33	38.20	39.57	40.94	42.31	43.69	45.07	46.47	47.90	49.36	52.48	56.22	59.57	61.55	62.59	63.05	63.48	63.89	64.28	64.66	65.04	65.41
92-100	20.55	21.65	22.82	24.02	25.25	26.49	27.75	29.03	30.32	31.75	34.19	36.98	39.32	39.37	39.41	39.46	39.50	39.54	39.58	39.62	39.66	39.70
92-102	26.79	28.12	29.60	31.13	32.73	34.34	35.95	37.58	39.21	41.03	43.83	47.07	49.21	49.21	49.21	49.21	49.21	49.21	49.21	49.21	49.21	49.21
93-94	30.15	31.59	33.06	34.55	36.03	37.52	39.02	40.53	42.09	43.67	46.86	50.73	54.10	56.17	57.33	57.91	58.45	58.94	59.43	59.92	60.33	60.70
94-95	19.83	21.33	22.84	24.39	25.86	27.39	29.01	30.70	32.37	34.44	38.59	45.15	48.83	48.83	48.83	48.83	48.83	48.83	48.83	48.83	48.83	48.83
94-96	3.85	4.35	5.02	5.86	6.80	7.89	9.04	10.24	11.73	13.35	18.26	25.95	31.03	32.36	33.03	33.67	34.15	34.56	34.96	35.34	35.71	36.07
94-100	38.65	39.53	40.40	41.28	42.15	43.04	43.92	44.94	46.18	47.60	49.26	52.40	55.03	55.44	55.44	55.44	55.44	55.44	55.44	55.44	55.44	55.44
95-96	14.49	15.03	15.58	16.13	16.68	17.24	17.85	18.54	19.29	20.05	20.92	22.84	25.14	25.90	25.90	25.90	25.90	25.90	25.90	25.90	25.90	25.90
96-97	17.35	17.81	18.26	18.72	19.20	19.67	20.15	20.62	21.12	21.62	22.23	24.20	26.69	26.92	27.04	27.04	27.04	27.04	27.04	27.04	27.04	27.04
98-100	0.28	0.33	0.39	0.44	0.49	0.55	0.61	0.73	0.84	0.96	2.13	9.63	13.56	13.56	13.56	13.56	13.56	13.56	13.56	13.56	13.56	13.56
99-100	10.46	10.82	11.21	11.65	12.13	12.64	13.18	13.75	14.34	15.10	19.58	26.75	30.81	30.81	30.81	30.81	30.81	30.81	30.81	30.81	30.81	30.81
100-101	16.65	17.05	17.59	18.28	19.09	20.00	21.06	22.20	23.43	24.85	27.00	29.76	31.70	31.70	31.70	31.70	31.70	31.70	31.70	31.70	31.70	31.70
100-103	84.44	88.04	91.65	95.26	98.88	102.52	106.16	109.81	113.46	117.13	120.90	126.60	130.31	130.31	130.31	130.31	130.31	130.31	130.31	130.31	130.31	130.31
100-104	43.46	44.69	45.94	47.19	48.46	49.73	51.01	52.30	53.60	54.90	56.24	58.13	59.45	59.67	59.67	59.67	59.67	59.67	59.67	59.67	59.67	59.67
100-106	47.03	48.31	49.59	50.88	52.18	53.49	54.81	56.13	57.45	58.79	60.15	62.05	63.38	63.38	63.38	63.38	63.38	63.38	63.38	63.38	63.38	63.38
101-102	21.94	23.29	24.76	26.27	27.83	29.40	30.98	32.56	34.16	35.93	38.70	41.86	43.97	43.97	43.97	43.97	43.97	43.97	43.97	43.97	43.97	43.97
103-104	29.87	30.34	30.81	31.30	31.79	32.29	32.80	33.31	33.83	34.36	34.90	35.69	36.23	36.23	36.23	36.23	36.23	36.23	36.23	36.23	36.23	36.23
103-105	37.25	37.95	38.66	39.38	40.11	40.84	41.59	42.34	43.10	43.87	44.66	45.78	46.56	46.56	46.56	46.56	46.56	46.56	46.56	46.56	46.56	46.56
103-110	44.92	46.39	47.87	49.36	50.86	52.36	53.88	55.40	56.93	58.46	60.08	62.27	63.89	63.90	63.90	63.90	63.90	63.90	63.90	63.90	63.90	63.90
104-105	31.27	32.83	34.40	36.00	37.60	39.22	40.85	42.50	44.15	45.81	47.51	49.81	51.47	51.47	51.47	51.47	51.47	51.47	51.47	51.47	51.47	51.47
105-106	2.16	2.58	3.00	3.46	4.05	4.71	5.42	6.17	6.95	7.84	8.92	10.45	11.58	11.58	11.58	11.58	11.58	11.58	11.58	11.58	11.58	11.58
105-107	20.15	20.75	21.37	21.99	22.60	23.22	23.84	24.46	25.08	25.72	26.40	27.32	27.96	27.96	27.96	27.96	27.96	27.96	27.96	27.96	27.96	27.96
105-108	13.42	14.55	15.69	16.83	17.97	19.12	20.27	21.43	22.60	23.90	25.40	27.44	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95	28.95
106-107	18.62	19.12	19.62	20.11	20.61	21.11	21.61	22.10	22.60	23.21	23.84	24.70	25.33	25.33	25.33	25.33	25.33	25.33	25.33	25.33	25.33	25.33
108-109	11.57	12.68	13.79	14.91	16.03	17.16	18.29	19.43	20.59	21.87	23.35	25.37	26.86	26.86	26.86	26.86	26.86	26.86	26.86	26.86	26.86	26.86
109-110	9.23	9.87	10.59	11.37	12.20	13.07	13.97	14.90	15.88	16.96	18.27	20.07	21.43	21.46	21.46	21.46	21.46	21.46	21.46	21.46	21.46	21.46
110-111	34.32	34.45	34.58	34.71	34.84	34.97	35.10	35.23	35.37	35.50	35.63	35.80	35.94	35.94	35.94	35.94	35.94	35.94	35.94	35.94	35.94	35.94
110-112	61.12	62.50	63.88	65.27	66.65	68.04	69.42	70.81	72.20	73.59	74.98	76.83	78.22	78.23	78.23	78.23	78.23	78.23	78.23	78.23	78.23	78.23
114-115	0.07	0.02	0.07	0.02	0.03	0.46	0.01	0.01	0.12	0.28	0.85	1.93	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73

Tabela B.13 – Resultados para as distribuições de possibilidade da potência activa injectada (MW) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo AC CFPF para a rede de 118 barramentos do Capítulo 3, secção 3.10: barramento 1 a 40

Pi	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
P1	-55.87	-55.82	-55.74	-55.65	-55.57	-55.48	-55.40	-55.25	-54.99	-54.66	-51.64	-50.36	-46.35	-42.33	-38.31	-34.30	-30.28	-26.27	-22.25	-18.23	-14.22	-10.20
P2	-36.00	-34.43	-32.85	-31.28	-29.70	-28.13	-26.55	-24.98	-23.40	-21.83	-20.25	-19.75	-18.18	-16.60	-15.03	-13.45	-11.88	-10.30	-8.73	-7.15	-5.58	-4.00
P3	-68.57	-66.91	-64.06	-60.99	-57.92	-54.84	-51.77	-48.70	-45.63	-42.56	-39.49	-38.51	-35.44	-32.37	-29.30	-26.23	-23.16	-20.09	-17.01	-13.94	-10.87	-7.80
P4	-70.20	-67.13	-64.06	-60.99	-57.92	-54.84	-51.77	-48.70	-45.63	-42.56	-39.49	-38.51	-35.44	-32.37	-29.30	-26.23	-23.16	-20.09	-17.01	-13.94	-10.87	-7.80
P5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P6	-93.60	-89.51	-85.41	-81.32	-77.22	-73.13	-69.03	-64.94	-60.84	-56.75	-52.65	-51.35	-47.26	-43.16	-39.07	-34.97	-30.88	-26.78	-22.69	-18.59	-14.50	-10.40
P7	-34.20	-32.70	-31.21	-29.71	-28.22	-26.72	-25.22	-23.73	-22.23	-20.73	-19.24	-18.76	-17.27	-15.77	-14.27	-12.78	-11.28	-9.79	-8.29	-6.79	-5.30	-3.80
P8	-50.40	-48.20	-45.99	-43.79	-41.58	-39.38	-37.17	-34.97	-32.76	-30.56	-28.35	-27.65	-25.45	-23.24	-21.04	-18.83	-16.63	-14.42	-12.22	-10.01	-7.81	-5.60
P9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P10	427.50	429.19	430.88	432.56	434.25	435.94	437.63	439.31	441.00	442.69	446.49	453.48	455.37	455.37	455.37	455.37	455.37	455.37	455.37	455.37	455.37	455.37
P11	-126.00	-120.49	-114.98	-109.46	-103.95	-98.44	-92.93	-87.41	-81.90	-76.39	-70.88	-69.13	-63.61	-58.10	-52.59	-47.08	-41.56	-36.05	-30.54	-25.03	-19.51	-14.00
P12	-3.85	0.17	4.19	8.21	12.23	16.25	20.27	24.29	28.31	32.33	36.35	39.65	43.67	47.69	51.71	55.73	59.75	63.77	67.79	71.81	75.83	79.85
P13	-61.20	-58.52	-55.85	-53.17	-50.49	-47.81	-45.14	-42.46	-39.78	-37.10	-34.43	-33.58	-30.90	-28.22	-25.54	-22.87	-20.19	-17.51	-14.83	-12.16	-9.48	-6.80
P14	-25.20	-24.10	-23.00	-21.89	-20.79	-19.69	-18.59	-17.48	-16.38	-15.28	-14.18	-13.83	-12.72	-11.62	-10.52	-9.42	-8.31	-7.21	-6.11	-5.01	-3.90	-2.80
P15	-142.17	-137.70	-132.97	-128.20	-123.37	-118.43	-113.42	-108.33	-103.19	-97.97	-91.13	-88.88	-81.79	-76.48	-71.01	-65.71	-60.39	-55.07	-49.71	-44.36	-38.98	-33.57
P16	-45.00	-43.03	-41.06	-39.09	-37.13	-35.16	-33.19	-31.22	-29.25	-27.28	-25.31	-24.69	-22.72	-20.75	-18.78	-16.81	-14.84	-12.88	-10.91	-8.94	-6.97	-5.00
P17	-19.80	-18.93	-18.07	-17.20	-16.34	-15.47	-14.60	-13.74	-12.87	-12.00	-11.14	-10.86	-10.00	-9.13	-8.26	-7.40	-6.53	-5.67	-4.80	-3.93	-3.07	-2.20
P18	-108.00	-103.28	-98.55	-93.83	-89.10	-84.38	-79.65	-74.93	-70.20	-65.48	-60.75	-59.25	-54.53	-49.80	-45.08	-40.35	-35.63	-30.90	-26.18	-21.45	-16.73	-12.00
P19	-81.00	-77.46	-73.91	-70.37	-66.83	-63.28	-59.74	-56.19	-52.65	-49.11	-45.56	-44.44	-40.89	-37.35	-33.81	-30.26	-26.72	-23.18	-19.63	-16.09	-12.54	-9.00
P20	-32.40	-30.98	-29.57	-28.15	-26.73	-25.31	-23.90	-22.48	-21.06	-19.64	-18.23	-17.78	-16.36	-14.94	-13.52	-12.11	-10.69	-9.27	-7.85	-6.44	-5.02	-3.60
P21	-16.80	-16.54	-16.28	-16.01	-15.75	-15.49	-15.23	-14.96	-14.70	-14.44	-14.18	-13.83	-13.56	-13.30	-13.04	-12.78	-12.51	-12.25	-11.99	-11.73	-11.46	-11.20
P22	-12.00	-11.81	-11.63	-11.44	-11.25	-11.06	-10.88	-10.69	-10.50	-10.31	-10.13	-9.88	-9.69	-9.50	-9.31	-9.13	-8.94	-8.75	-8.56	-8.38	-8.19	-8.00
P23	-8.40	-8.27	-8.14	-8.01	-7.88	-7.74	-7.61	-7.48	-7.35	-7.22	-7.09	-6.91	-6.78	-6.65	-6.52	-6.39	-6.26	-6.13	-5.99	-5.86	-5.73	-5.60
P24	-15.60	-15.36	-15.11	-14.87	-14.63	-14.38	-14.14	-13.89	-13.65	-13.41	-13.16	-12.84	-12.59	-12.35	-12.11	-11.86	-11.62	-11.38	-11.13	-10.89	-10.64	-10.40
P25	209.00	209.83	210.65	211.48	212.30	213.13	213.95	214.78	215.60	216.43	217.25	222.75	223.58	224.40	225.23	226.05	226.88	227.70	228.53	229.35	230.18	231.00
P26	298.30	299.48	300.66	301.83	303.01	304.19	305.37	306.54	307.72	308.90	310.08	317.93	319.10	320.28	321.46	322.64	323.81	324.99	326.17	327.35	327.35	327.35
P27	-85.20	-83.87	-82.54	-81.21	-79.88	-78.54	-77.21	-75.88	-74.55	-73.22	-71.89	-70.11	-68.78	-67.45	-66.12	-64.79	-63.46	-62.13	-60.79	-59.46	-58.13	-56.80
P28	-20.40	-20.08	-19.76	-19.44	-19.13	-18.81	-18.49	-18.17	-17.85	-17.53	-17.21	-16.79	-16.47	-16.15	-15.83	-15.51	-15.19	-14.88	-14.56	-14.24	-13.92	-13.60
P29	-28.80	-28.35	-27.90	-27.45	-27.00	-26.55	-26.10	-25.65	-25.20	-24.75	-24.30	-23.70	-23.25	-22.80	-22.35	-21.90	-21.45	-21.00	-20.55	-20.10	-19.65	-19.20
P30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P31	-49.61	-49.16	-48.70	-48.22	-47.74	-47.24	-46.74	-46.24	-45.74	-45.24	-44.74	-44.24	-43.74	-43.24	-42.74	-42.24	-41.74	-41.24	-40.74	-40.24	-39.74	-39.24
P32	-88.50	-85.62	-82.75	-79.87	-77.00	-74.12	-71.24	-68.37	-65.49	-62.61	-59.74	-58.26	-55.39	-52.51	-49.63	-46.76	-43.88	-41.01	-38.13	-35.25	-32.38	-29.50
P33	-34.50	-33.38	-32.26	-31.14	-30.02	-28.89	-27.77	-26.65	-25.53	-24.41	-23.29	-22.71	-21.59	-20.47	-19.35	-18.23	-17.11	-15.99	-14.86	-13.74	-12.62	-11.50
P34	-88.50	-85.62	-82.75	-79.87	-77.00	-74.12	-71.24	-68.37	-65.49	-62.61	-59.74	-58.26	-55.39	-52.51	-49.63	-46.76	-43.88	-41.01	-38.13	-35.25	-32.38	-29.50
P35	-48.20	-47.89	-46.28	-44.67	-43.07	-41.46	-39.85	-38.24	-36.63	-35.02	-33.41	-32.59	-30.98	-29.37	-27.76	-26.15	-24.54	-22.94	-21.33	-19.72	-18.11	-16.50
P36	-41.56	-41.54	-41.52	-41.49	-40.46	-38.94	-37.43	-35.92	-34.41	-32.90	-31.39	-30.61	-29.10	-27.59	-26.08	-24.57	-23.06	-21.55	-20.03	-18.52	-17.01	-15.50
P37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P39	-40.50	-39.18	-37.87	-36.55	-35.24	-33.92	-32.60	-31.29	-29.97	-28.65	-27.34	-26.66	-25.35	-24.03	-22.71	-21.40	-20.08	-18.77	-17.45	-16.13	-14.82	-13.50
P40	-90.58	-90.03	-89.48	-88.93	-88.38	-87.83	-87.28	-86.73	-86.18	-85.63	-85.08	-84.53	-83.98	-83.43	-82.88	-82.33	-81.78	-81.23	-80.68	-80.13	-79.58	-79.03

Tabela B.14 – Resultados para as distribuições de possibilidade da potência activa injectada (MW) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo AC CFPF para a rede de 118 barramentos do Capítulo 3, secção 3.10: barramento 41 a 80

Pi	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
P41	-44.40	-43.71	-43.01	-42.32	-41.63	-40.93	-40.24	-39.54	-38.85	-38.16	-37.46	-36.54	-35.84	-35.15	-34.46	-33.76	-33.07	-32.38	-31.68	-30.99	-30.29	-29.60
P42	-115.20	-113.40	-111.60	-109.80	-108.00	-106.20	-104.40	-102.60	-100.80	-99.00	-97.20	-94.80	-93.00	-91.20	-89.40	-87.60	-85.80	-84.00	-82.20	-80.40	-78.60	-76.80
P43	-21.60	-21.26	-20.93	-20.59	-20.25	-19.91	-19.58	-19.24	-18.90	-18.56	-18.23	-17.78	-17.44	-17.10	-16.76	-16.43	-16.09	-15.75	-15.41	-15.08	-14.74	-14.40
P44	-19.20	-18.90	-18.60	-18.30	-18.00	-17.70	-17.40	-17.10	-16.80	-16.50	-16.20	-15.80	-15.50	-15.20	-14.90	-14.60	-14.30	-14.00	-13.70	-13.40	-13.10	-12.80
P45	-63.60	-62.61	-61.61	-60.62	-59.63	-58.63	-57.64	-56.64	-55.65	-54.66	-53.66	-52.34	-51.34	-50.35	-49.36	-48.36	-47.37	-46.38	-45.38	-44.39	-43.39	-42.40
P46	-15.55	-14.95	-14.36	-13.76	-13.17	-12.57	-11.97	-11.38	-10.78	-10.18	-9.59	-8.41	-7.82	-7.22	-6.62	-6.03	-5.43	-4.84	-4.24	-3.64	-3.05	-2.45
P47	-40.80	-40.16	-39.53	-38.89	-38.25	-37.61	-36.98	-36.34	-35.70	-35.06	-34.43	-33.58	-32.94	-32.30	-31.66	-31.03	-30.39	-29.75	-29.11	-28.48	-27.84	-27.20
P48	-24.00	-23.63	-23.25	-22.88	-22.50	-22.13	-21.75	-21.38	-21.00	-20.63	-20.25	-19.75	-19.38	-19.00	-18.63	-18.25	-17.88	-17.50	-17.13	-16.75	-16.38	-16.00
P49	89.40	91.80	94.19	96.59	98.99	101.38	103.78	106.17	108.57	110.97	113.36	120.64	123.03	125.43	127.83	130.22	132.62	135.02	137.41	139.81	142.20	144.60
P50	-20.40	-20.08	-19.76	-19.44	-19.13	-18.81	-18.49	-18.17	-17.85	-17.53	-17.21	-16.79	-16.47	-16.15	-15.83	-15.51	-15.19	-14.88	-14.56	-14.24	-13.92	-13.60
P51	-20.40	-20.08	-19.76	-19.44	-19.13	-18.81	-18.49	-18.17	-17.85	-17.53	-17.21	-16.79	-16.47	-16.15	-15.83	-15.51	-15.19	-14.88	-14.56	-14.24	-13.92	-13.60
P52	-21.60	-21.26	-20.93	-20.59	-20.25	-19.91	-19.58	-19.24	-18.90	-18.56	-18.23	-17.78	-17.44	-17.10	-16.76	-16.43	-16.09	-15.75	-15.41	-15.08	-14.74	-14.40
P53	-26.82	-26.77	-26.72	-26.31	-25.88	-25.44	-25.01	-24.58	-24.15	-23.72	-23.29	-22.71	-22.28	-21.85	-21.42	-20.99	-20.56	-20.13	-19.69	-19.26	-18.83	-18.40
P54	-90.00	-87.70	-85.40	-83.10	-80.81	-78.51	-76.21	-73.91	-71.61	-69.31	-67.01	-62.99	-60.69	-58.39	-56.09	-53.79	-51.49	-49.20	-46.90	-44.60	-42.30	-40.00
P55	-70.38	-70.38	-70.38	-70.38	-70.38	-69.69	-68.51	-67.33	-66.15	-64.97	-63.79	-62.21	-61.03	-59.85	-58.67	-57.49	-56.31	-55.13	-53.94	-52.76	-51.58	-50.40
P56	-100.80	-99.23	-97.65	-96.08	-94.50	-92.93	-91.35	-89.78	-88.20	-86.63	-85.05	-82.95	-81.38	-79.80	-78.23	-76.65	-75.08	-73.50	-71.93	-70.35	-68.78	-67.20
P57	-14.40	-14.18	-13.95	-13.73	-13.50	-13.28	-13.05	-12.83	-12.60	-12.38	-12.15	-11.85	-11.63	-11.40	-11.18	-10.95	-10.73	-10.50	-10.28	-10.05	-9.83	-9.60
P58	-14.40	-14.18	-13.95	-13.73	-13.50	-13.28	-13.05	-12.83	-12.60	-12.38	-12.15	-11.85	-11.63	-11.40	-11.18	-10.95	-10.73	-10.50	-10.28	-10.05	-9.83	-9.60
P59	-185.15	-179.38	-173.60	-167.83	-162.05	-156.28	-150.50	-144.73	-138.95	-133.18	-127.40	-116.60	-110.83	-105.05	-99.28	-93.50	-87.73	-81.95	-76.18	-70.40	-64.63	-58.85
P60	-156.00	-148.30	-140.60	-132.89	-125.19	-117.49	-109.79	-102.08	-94.38	-86.68	-78.98	-77.03	-73.22	-69.42	-65.62	-61.82	-58.01	-54.21	-50.41	-46.61	-42.80	-39.00
P61	152.00	152.60	153.20	153.80	154.40	155.00	155.60	156.20	156.80	157.40	158.00	162.00	162.60	163.20	163.80	164.40	165.00	165.60	166.20	166.80	167.40	168.00
P62	-110.19	-107.16	-104.09	-101.00	-97.90	-94.79	-91.65	-88.51	-85.34	-82.11	-77.96	-76.04	-72.28	-68.53	-64.78	-61.02	-57.27	-53.52	-49.76	-46.01	-42.25	-38.50
P63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P65	371.45	372.92	374.38	375.85	377.32	378.78	380.25	381.71	383.18	384.65	386.11	395.89	397.35	398.82	400.29	401.75	403.22	404.69	406.15	407.62	409.08	410.55
P66	294.40	299.72	305.04	310.36	315.69	321.01	326.33	331.65	336.97	342.29	347.61	358.39	361.76	365.13	368.50	371.87	375.24	378.62	381.99	385.36	388.73	392.10
P67	-56.00	-53.24	-50.47	-47.71	-44.94	-42.18	-39.41	-36.65	-33.88	-31.12	-28.35	-27.65	-26.29	-24.92	-23.56	-22.19	-20.83	-19.46	-18.10	-16.73	-15.37	-14.00
P68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P69	488.21	490.14	492.06	493.99	495.92	497.85	499.77	501.70	503.63	505.55	507.48	520.33	522.26	524.18	526.11	528.04	529.96	531.89	533.82	535.75	537.67	539.60
P70	-101.55	-98.95	-96.28	-93.58	-90.85	-88.10	-85.32	-82.58	-79.55	-73.34	-66.83	-65.18	-61.96	-58.74	-55.52	-52.31	-49.09	-45.87	-42.65	-39.44	-36.22	-33.00
P71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P72	-19.80	-19.72	-18.96	-18.20	-17.43	-16.66	-15.89	-15.10	-14.32	-13.34	-12.15	-11.85	-11.27	-10.68	-10.10	-9.51	-8.93	-8.34	-7.76	-7.17	-6.59	-6.00
P73	-6.30	-6.30	-6.30	-6.29	-6.29	-6.29	-6.29	-6.28	-6.28	-6.28	-6.08	-5.93	-5.63	-5.34	-5.05	-4.76	-4.46	-4.17	-3.88	-3.59	-3.29	-3.00
P74	-75.36	-75.35	-75.34	-75.31	-75.28	-75.24	-75.20	-75.15	-75.09	-73.66	-68.85	-67.15	-63.84	-60.52	-57.21	-53.89	-50.58	-47.26	-43.95	-40.63	-37.32	-34.00
P75	-94.00	-89.36	-84.72	-80.08	-75.44	-70.79	-66.15	-61.51	-56.87	-52.23	-47.59	-46.41	-44.12	-41.83	-39.54	-37.25	-34.96	-32.67	-30.37	-28.08	-25.79	-23.50
P76	-80.98	-80.78	-80.54	-80.25	-79.91	-79.52	-79.07	-78.56	-77.15	-74.08	-68.85	-67.15	-63.84	-60.52	-57.21	-53.89	-50.58	-47.26	-43.95	-40.63	-37.32	-34.00
P77	-122.00	-115.98	-109.95	-103.93	-97.91	-91.88	-85.86	-79.83	-73.81	-67.79	-61.76	-60.24	-57.26	-54.29	-51.32	-48.34	-45.37	-42.40	-39.42	-36.45	-33.47	-30.50
P78	-83.57	-83.38	-83.19	-82.99	-82.78	-82.56	-82.33	-82.08	-81.81	-78.90	-71.89	-70.11	-66.65	-63.19	-59.73	-56.27	-52.81	-49.35	-45.88	-42.42	-38.96	-35.50
P79	-78.00	-74.15	-70.30	-66.45	-62.60	-58.74	-54.89	-51.04	-47.19	-43.34	-39.49	-38.51	-36.61	-34.71	-32.81	-30.91	-29.01	-27.11	-25.20	-23.30	-21.40	-19.50
P80	193.15	207.78	222.40	237.03	251.66	266.28	280.91	295.53	310.16	324.79	339.41	354.59	362.71	370.84	378.97	387.09	395.22	403.35	411.47	419.60	427.72	431.66

Tabela B.15 – Resultados para as distribuições de possibilidade da potência activa injectada (MW) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo AC CFPF para a rede de 118 barramentos do Capítulo 3, secção 3.10: barramento 81 a 118

Pi	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
P81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P82	-100.44	-100.06	-97.34	-92.00	-86.67	-81.34	-76.01	-70.67	-65.34	-60.01	-54.68	-53.33	-50.69	-48.06	-45.43	-42.80	-40.16	-37.53	-34.90	-32.27	-29.63	-27.00
P83	-40.00	-38.03	-36.05	-34.08	-32.10	-30.13	-28.15	-26.18	-24.20	-22.23	-20.25	-19.75	-18.78	-17.80	-16.83	-15.85	-14.88	-13.90	-12.93	-11.95	-10.98	-10.00
P84	-22.00	-20.91	-19.83	-18.74	-17.66	-16.57	-15.48	-14.40	-13.31	-12.22	-11.14	-10.86	-10.33	-9.79	-9.25	-8.72	-8.18	-7.65	-7.11	-6.57	-6.04	-5.50
P85	-48.00	-45.63	-43.26	-40.89	-38.52	-36.15	-33.78	-31.41	-29.04	-26.67	-24.30	-23.70	-22.53	-21.36	-20.19	-19.02	-17.85	-16.68	-15.51	-14.34	-13.17	-12.00
P86	-22.42	-22.40	-22.35	-22.29	-22.24	-22.18	-22.12	-22.06	-22.01	-21.94	-21.26	-20.74	-19.71	-18.69	-17.67	-16.64	-15.62	-14.60	-13.57	-12.55	-11.52	-10.50
P87	3.80	3.82	3.83	3.85	3.86	3.88	3.89	3.91	3.92	3.94	3.95	4.05	4.07	4.08	4.10	4.11	4.13	4.14	4.16	4.17	4.19	4.20
P88	-80.66	-78.65	-76.58	-74.50	-72.36	-70.17	-67.56	-62.82	-58.08	-53.34	-48.60	-47.40	-45.06	-42.72	-40.38	-38.04	-35.70	-33.36	-31.02	-28.68	-26.34	-24.00
P89	576.65	578.93	581.20	583.48	585.76	588.03	590.31	592.58	594.86	597.14	601.27	612.85	616.86	619.14	621.42	623.69	625.97	628.25	630.52	632.80	635.07	637.35
P90	-175.90	-175.36	-174.81	-174.25	-173.67	-173.08	-172.47	-171.79	-171.08	-170.34	-165.04	-160.96	-153.83	-148.33	-142.83	-137.28	-131.69	-126.06	-120.39	-114.66	-108.89	-103.08
P91	-12.00	-11.81	-11.63	-11.44	-11.25	-11.06	-10.88	-10.69	-10.50	-10.31	-10.13	-9.88	-9.69	-9.50	-9.31	-9.13	-8.94	-8.75	-8.56	-8.38	-8.19	-8.00
P92	-78.00	-76.78	-75.56	-74.34	-73.13	-71.91	-70.69	-69.47	-68.25	-67.03	-65.81	-64.19	-62.97	-61.75	-60.53	-59.31	-58.09	-56.88	-55.66	-54.44	-53.22	-52.00
P93	-14.40	-14.18	-13.95	-13.73	-13.50	-13.28	-13.05	-12.83	-12.60	-12.38	-12.15	-11.85	-11.63	-11.40	-11.18	-10.95	-10.73	-10.50	-10.28	-10.05	-9.83	-9.60
P94	-36.00	-35.44	-34.88	-34.31	-33.75	-33.19	-32.63	-32.06	-31.50	-30.94	-30.38	-29.63	-29.06	-28.50	-27.94	-27.38	-26.81	-26.25	-25.69	-25.13	-24.56	-24.00
P95	-50.40	-49.61	-48.83	-48.04	-47.25	-46.46	-45.68	-44.89	-44.10	-43.31	-42.53	-41.48	-40.69	-39.90	-39.11	-38.33	-37.54	-36.75	-35.96	-35.18	-34.39	-33.60
P96	-45.60	-44.89	-44.18	-43.46	-42.75	-42.04	-41.33	-40.61	-39.90	-39.19	-38.48	-37.53	-36.81	-36.10	-35.39	-34.68	-33.96	-33.25	-32.54	-31.83	-31.11	-30.40
P97	-18.00	-17.72	-17.44	-17.16	-16.88	-16.59	-16.31	-16.03	-15.75	-15.47	-15.19	-14.81	-14.53	-14.25	-13.97	-13.69	-13.41	-13.13	-12.84	-12.56	-12.28	-12.00
P98	-40.80	-40.16	-39.53	-38.89	-38.25	-37.61	-36.98	-36.34	-35.70	-35.06	-34.43	-33.58	-32.94	-32.30	-31.66	-31.03	-30.39	-29.75	-29.11	-28.48	-27.84	-27.20
P99	-50.40	-49.61	-48.83	-48.04	-47.25	-46.46	-45.68	-44.89	-44.10	-43.31	-42.53	-41.48	-40.69	-39.90	-39.11	-38.33	-37.54	-36.75	-35.96	-35.18	-34.39	-33.60
P100	195.00	196.64	198.28	199.92	201.56	203.19	204.83	206.47	208.11	209.75	211.39	218.61	220.25	221.89	223.53	225.17	226.81	228.45	230.08	231.72	233.36	235.00
P101	-26.40	-25.99	-25.58	-25.16	-24.75	-24.34	-23.93	-23.51	-23.10	-22.69	-22.28	-21.73	-21.31	-20.90	-20.49	-20.08	-19.66	-19.25	-18.84	-18.43	-18.01	-17.60
P102	-6.00	-5.91	-5.81	-5.72	-5.63	-5.53	-5.44	-5.34	-5.25	-5.16	-5.06	-4.94	-4.84	-4.75	-4.66	-4.56	-4.47	-4.38	-4.28	-4.19	-4.09	-4.00
P103	10.40	10.98	11.56	12.14	12.73	13.31	13.89	14.47	15.05	15.63	16.21	17.79	18.37	18.95	19.53	20.11	20.69	21.28	21.86	22.44	23.02	23.60
P104	-45.60	-44.89	-44.18	-43.46	-42.75	-42.04	-41.33	-40.61	-39.90	-39.19	-38.48	-37.53	-36.81	-36.10	-35.39	-34.68	-33.96	-33.25	-32.54	-31.83	-31.11	-30.40
P105	-37.20	-36.62	-36.04	-35.46	-34.88	-34.29	-33.71	-33.13	-32.55	-31.97	-31.39	-30.61	-30.03	-29.45	-28.87	-28.29	-27.71	-27.13	-26.54	-25.96	-25.38	-24.80
P106	-51.60	-50.79	-49.99	-49.18	-48.38	-47.57	-46.76	-45.96	-45.15	-44.34	-43.54	-42.46	-41.66	-40.85	-40.04	-39.24	-38.43	-37.63	-36.82	-36.01	-35.21	-34.40
P107	-52.14	-52.13	-52.13	-52.12	-52.11	-52.11	-52.10	-52.09	-52.09	-51.56	-50.63	-49.38	-48.44	-47.50	-46.56	-45.63	-44.69	-43.75	-42.81	-41.88	-40.94	-40.00
P108	-2.40	-2.36	-2.33	-2.29	-2.25	-2.21	-2.18	-2.14	-2.10	-2.06	-2.03	-1.98	-1.94	-1.90	-1.86	-1.83	-1.79	-1.75	-1.71	-1.68	-1.64	-1.60
P109	-9.60	-9.45	-9.30	-9.15	-9.00	-8.85	-8.70	-8.55	-8.40	-8.25	-8.10	-7.90	-7.75	-7.60	-7.45	-7.30	-7.15	-7.00	-6.85	-6.70	-6.55	-6.40
P110	-46.80	-46.07	-45.34	-44.61	-43.88	-43.14	-42.41	-41.68	-40.95	-40.22	-39.49	-38.51	-37.78	-37.05	-36.32	-35.59	-34.86	-34.13	-33.39	-32.66	-31.93	-31.20
P111	34.59	34.72	34.85	34.98	35.12	35.25	35.38	35.51	35.65	35.78	35.91	36.09	36.22	36.23	36.23	36.23	36.23	36.23	36.23	36.23	36.23	36.23
P112	-70.13	-70.13	-70.13	-70.13	-70.13	-70.13	-70.13	-70.13	-70.13	-70.13	-68.85	-67.15	-65.88	-64.60	-63.33	-62.05	-60.78	-59.50	-58.23	-56.95	-55.68	-54.40
P113	-7.20	-7.09	-6.98	-6.86	-6.75	-6.64	-6.53	-6.41	-6.30	-6.19	-6.08	-5.93	-5.81	-5.70	-5.59	-5.48	-5.36	-5.25	-5.14	-5.03	-4.91	-4.80
P114	-9.60	-9.45	-9.30	-9.15	-9.00	-8.85	-8.70	-8.55	-8.40	-8.25	-8.10	-7.90	-7.75	-7.60	-7.45	-7.30	-7.15	-7.00	-6.85	-6.70	-6.55	-6.40
P115	-24.86	-24.85	-24.83	-24.81	-24.75	-24.34	-23.93	-23.51	-23.10	-22.69	-22.28	-21.73	-21.31	-20.90	-20.49	-20.08	-19.66	-19.25	-18.84	-18.43	-18.01	-17.60
P116	-189.98	-190.20	-190.20	-190.20	-190.20	-190.20	-190.20	-190.20	-190.20	-189.75	-186.30	-181.70	-178.25	-174.80	-171.35	-167.90	-164.45	-161.00	-157.55	-154.10	-150.65	-147.20
P117	-21.03	-21.01	-20.98	-20.95	-20.92	-20.89	-20.86	-20.82	-20.79	-20.63	-20.25	-19.75	-19.38	-19.00	-18.63	-18.25	-17.88	-17.50	-17.13	-16.75	-16.38	-16.00
P118	-39.60	-38.98	-38.36	-37.74	-37.13	-36.51	-35.89	-35.27	-34.65	-34.03	-33.41	-32.59	-31.97	-31.35	-30.73	-30.11	-29.49	-28.88	-28.26	-27.64	-27.02	-26.40

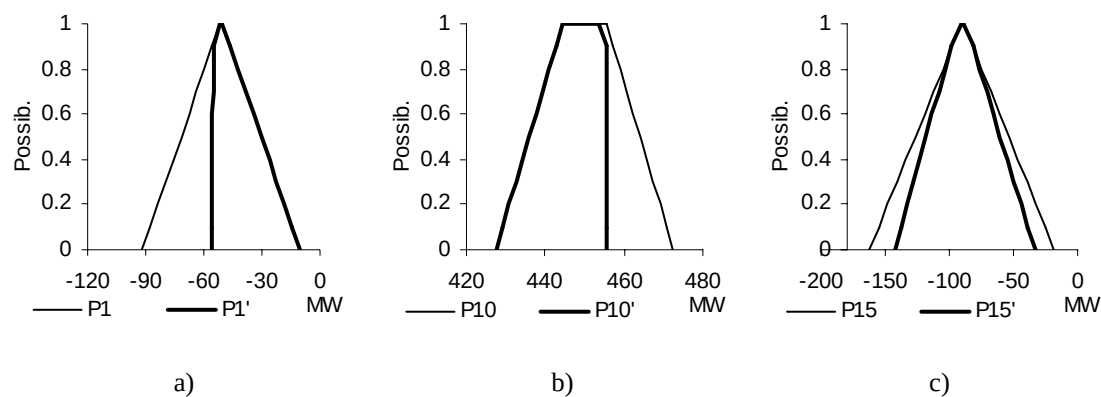


Figura B.1 - Distribuição de possibilidade para as potências activas injectadas nos barramentos 1 (a), 10 (b) e 15 (c): rede de 118 barramentos, secção 3.10

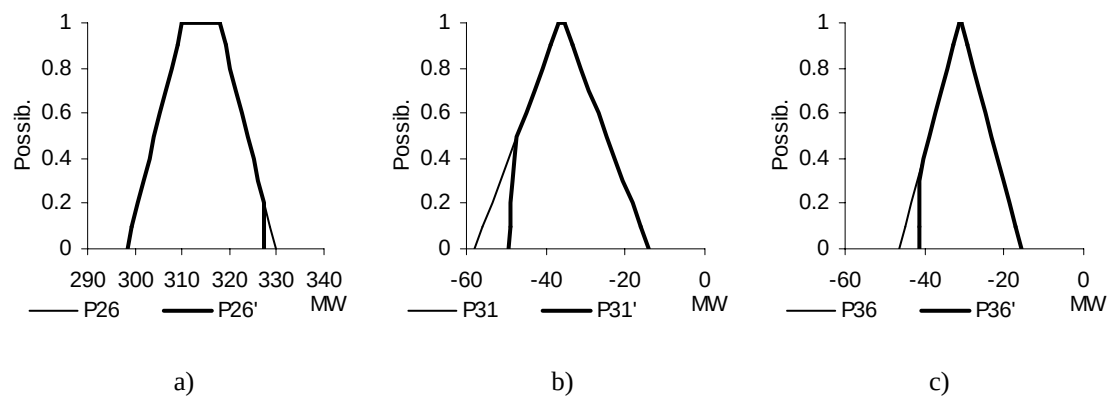


Figura B.2 - Distribuição de possibilidade para as potências activas injectadas nos barramentos 26 (a), 31 (b) e 36 (c): rede de 118 barramentos, secção 3.10

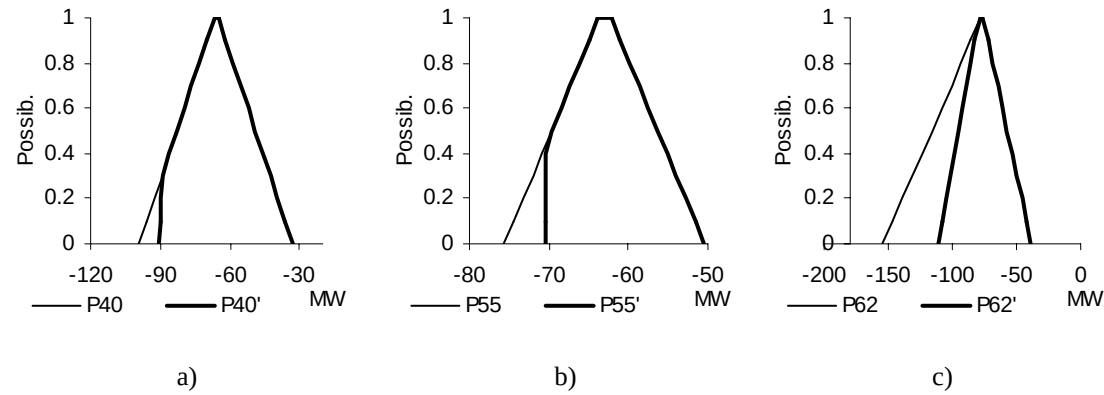


Figura B.3 - Distribuição de possibilidade para as potências activas injectadas nos barramentos 40 (a), 55 (b) e 62 (c): rede de 118 barramentos, secção 3.10

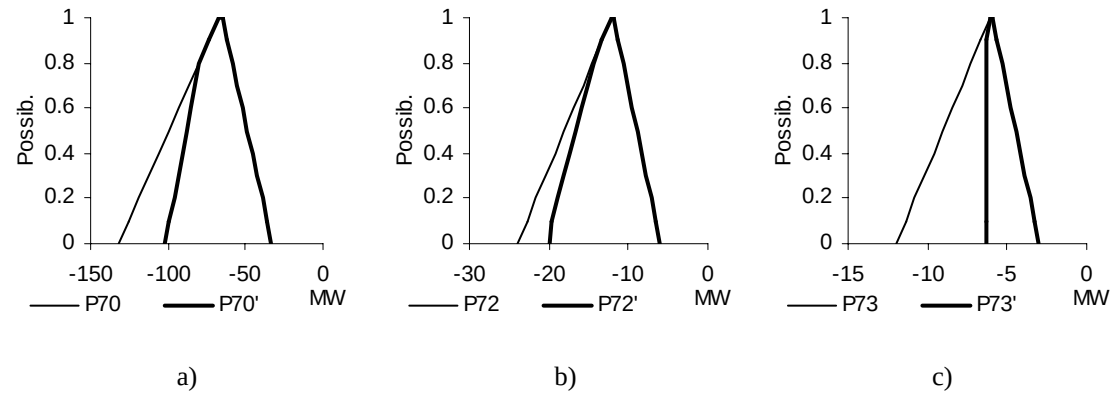


Figura B.4 Distribuição de possibilidade para as potências activas injectadas nos barramentos 70 (a), 72 (b) e 73 (c): rede de 118 barramentos, secção 3.10

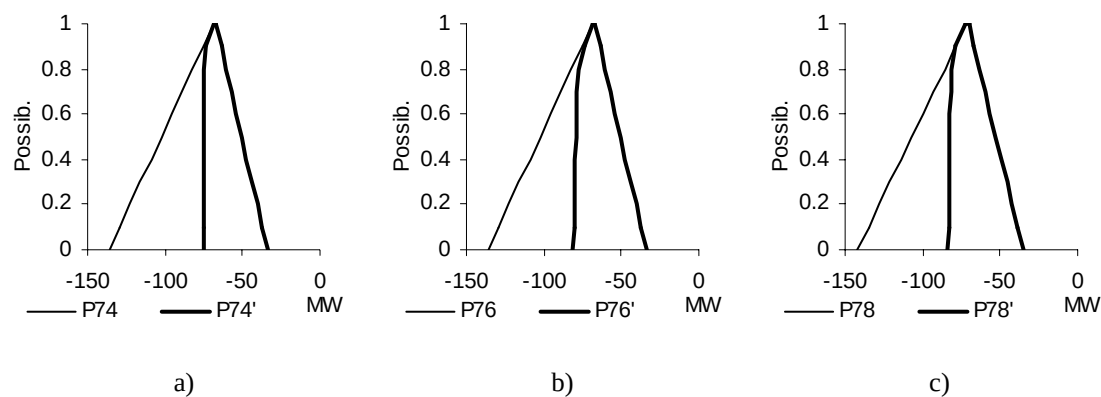


Figura B.5 Distribuição de possibilidade para as potências activas injectadas nos barramentos 74 (a), 76 (b) e 78 (c): rede de 118 barramentos, secção 3.10

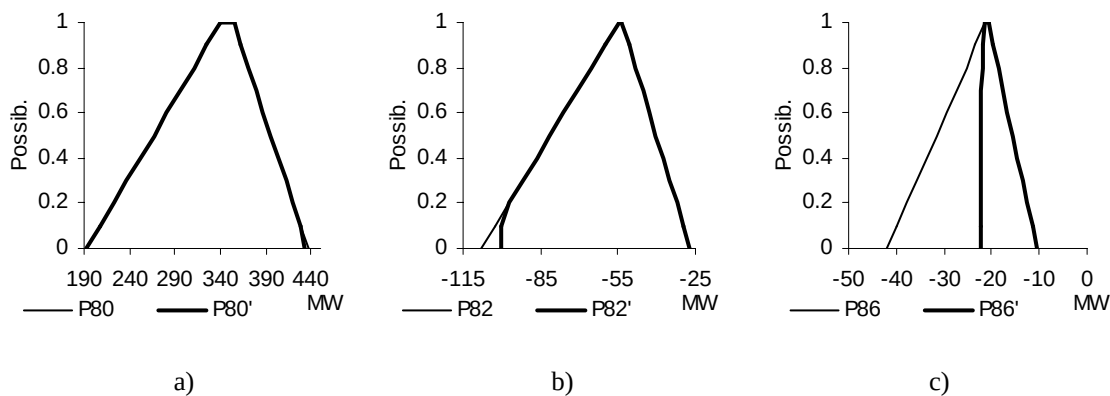


Figura B.6 Distribuição de possibilidade para as potências activas injectadas nos barramentos 80 (a), 82 (b) e 86 (c): rede de 118 barramentos, secção 3.10

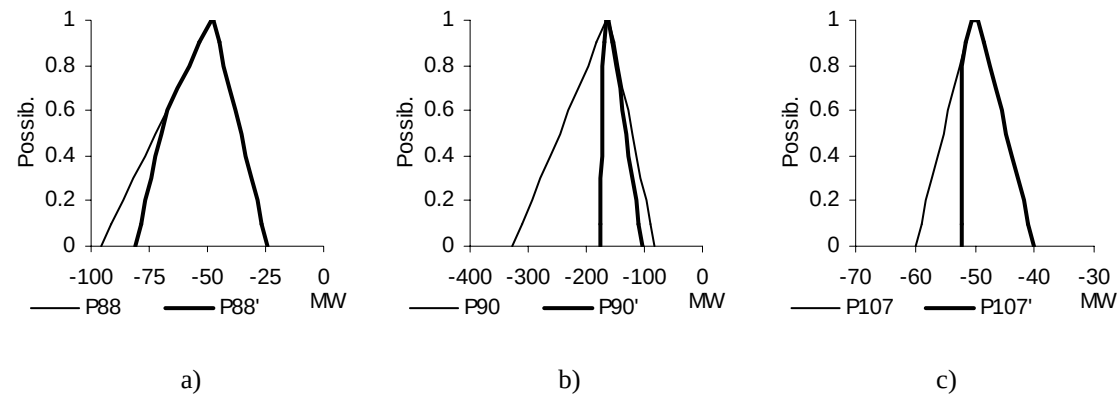


Figura B.7 Distribuição de possibilidade para as potências activas injectadas nos barramentos 88 (a), 90 (b) e 107 (c): rede de 118 barramentos, secção 3.10

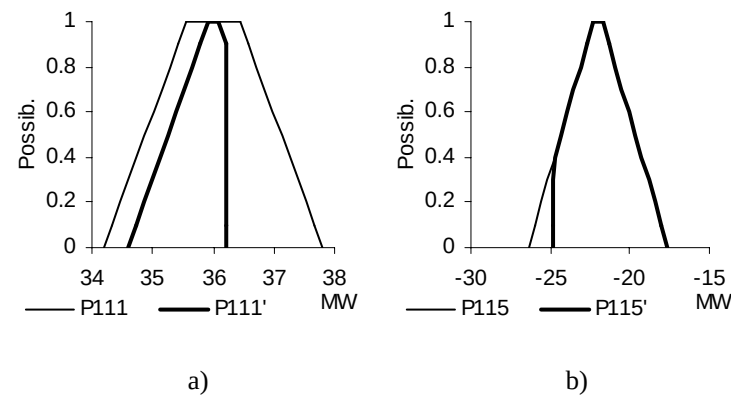


Figura B.8 Distribuição de possibilidade para as potências activas injectadas nos barramentos 111 (a) e 115 (b): rede de 118 barramentos, secção 3.10

Tabela B.16 – Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência activa (pu) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo DC SFPF para a rede de 14 barramentos do Capítulo 4, secção 4.4.1

P i-k	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
P 1-2	1.5389	1.5566	1.5742	1.5918	1.6094	1.6270	1.6446	1.6622	1.6798	1.6974	1.7150	1.7355	1.7526	1.7696	1.7866	1.8037	1.8207	1.8377	1.8548	1.8718	1.8888	1.9059
P 1-5	0.7062	0.7197	0.7332	0.7467	0.7602	0.7737	0.7872	0.8007	0.8142	0.8277	0.8418	0.8527	0.8677	0.8818	0.8959	0.9100	0.9240	0.9381	0.9522	0.9663	0.9804	0.9945
P 2-3	0.4678	0.4955	0.5231	0.5508	0.5785	0.6062	0.6338	0.6615	0.6892	0.7168	0.7446	0.7572	0.7844	0.8116	0.8388	0.8660	0.8932	0.9204	0.9476	0.9748	1.0020	1.0291
P 2-4	0.4744	0.4921	0.5098	0.5275	0.5452	0.5629	0.5806	0.5984	0.6161	0.6338	0.6525	0.6629	0.6831	0.7020	0.7209	0.7397	0.7586	0.7775	0.7963	0.8152	0.8341	0.8530
P 2-5	0.3146	0.3326	0.3505	0.3685	0.3864	0.4044	0.4224	0.4403	0.4583	0.4762	0.4953	0.5041	0.5246	0.5435	0.5624	0.5813	0.6003	0.6192	0.6381	0.6570	0.6759	0.6949
P 3-4	-0.5819	-0.5437	-0.5054	-0.4671	-0.4288	-0.3905	-0.3523	-0.3140	-0.2757	-0.2374	-0.1981	-0.1842	-0.1441	-0.1053	-0.0664	-0.0276	0.0112	0.0501	0.0889	0.1277	0.1666	0.2054
P 4-5	-0.9879	-0.9589	-0.9300	-0.9010	-0.8721	-0.8431	-0.8141	-0.7852	-0.7562	-0.7273	-0.6976	-0.6834	-0.6458	-0.6088	-0.5718	-0.5348	-0.4978	-0.4608	-0.4238	-0.3868	-0.3498	-0.3129
P 4-7	0.0408	0.0794	0.1180	0.1566	0.1952	0.2338	0.2724	0.3110	0.3496	0.3882	0.4268	0.4362	0.4919	0.5427	0.5935	0.6443	0.6950	0.7458	0.7966	0.8474	0.8982	0.9489
P 4-9	0.0234	0.0455	0.0677	0.0898	0.1120	0.1341	0.1563	0.1784	0.2006	0.2227	0.2449	0.2503	0.2823	0.3114	0.3405	0.3697	0.3988	0.4279	0.4571	0.4862	0.5154	0.5445
P 5-6	0.1399	0.1833	0.2268	0.2703	0.3138	0.3573	0.4007	0.4442	0.4877	0.5312	0.5747	0.5861	0.6470	0.7028	0.7586	0.8144	0.8702	0.9259	0.9817	1.0375	1.0933	1.1491
P 6-11	-0.1363	-0.1132	-0.0900	-0.0668	-0.0437	-0.0205	0.0026	0.0258	0.0490	0.0721	0.0953	0.1000	0.1255	0.1508	0.1760	0.2013	0.2266	0.2519	0.2772	0.3025	0.3278	0.3531
P 6-12	0.0060	0.0166	0.0273	0.0379	0.0486	0.0592	0.0698	0.0805	0.0911	0.1018	0.1124	0.1148	0.1343	0.1532	0.1722	0.1911	0.2100	0.2289	0.2478	0.2667	0.2857	0.3046
P 6-13	0.0209	0.0443	0.0676	0.0909	0.1143	0.1376	0.1609	0.1843	0.2076	0.2309	0.2543	0.2599	0.3001	0.3383	0.3766	0.4148	0.4530	0.4913	0.5295	0.5677	0.6060	0.6442
P 7-8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P 7-9	0.0408	0.0794	0.1180	0.1566	0.1952	0.2338	0.2724	0.3110	0.3496	0.3882	0.4268	0.4362	0.4919	0.5427	0.5935	0.6443	0.6950	0.7458	0.7966	0.8474	0.8982	0.9489
P 9-10	-0.2018	-0.1729	-0.1440	-0.1152	-0.0863	-0.0575	-0.0286	0.0003	0.0291	0.0580	0.0869	0.0928	0.1194	0.1460	0.1726	0.1992	0.2258	0.2524	0.2791	0.3057	0.3323	0.3589
P 9-14	-0.1192	-0.0929	-0.0666	-0.0403	-0.0140	0.0123	0.0386	0.0649	0.0912	0.1175	0.1439	0.1497	0.1781	0.2065	0.2349	0.2633	0.2916	0.3200	0.3484	0.3768	0.4052	0.4336
P 10-11	-0.2995	-0.2743	-0.2491	-0.2239	-0.1987	-0.1736	-0.1484	-0.1232	-0.0980	-0.0728	-0.0475	-0.0428	-0.0198	0.0032	0.0262	0.0492	0.0722	0.0952	0.1183	0.1413	0.1643	0.1873
P 12-13	-0.1264	-0.1117	-0.0970	-0.0822	-0.0675	-0.0527	-0.0380	-0.0233	-0.0085	0.0062	0.0210	0.0233	0.0380	0.0526	0.0671	0.0816	0.0961	0.1106	0.1251	0.1396	0.1541	0.1686
P 13-14	-0.1805	-0.1550	-0.1295	-0.1040	-0.0786	-0.0531	-0.0276	-0.0021	0.0233	0.0488	0.0743	0.0792	0.1026	0.1259	0.1493	0.1726	0.1959	0.2193	0.2426	0.2660	0.2893	0.3126

Tabela B.17 – Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência activa (pu) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo DC CFPF para a rede de 14 barramentos do Capítulo 4, secção 4.4.1

P' i-k	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
P' 1-2	1.6150	1.6241	1.6333	1.6424	1.6516	1.6607	1.6699	1.6790	1.6882	1.6984	1.7150	1.7355	1.7440	1.7440	1.7440	1.7440	1.7440	1.7440	1.7440	1.7440	1.7440	1.7440
P' 1-5	0.7702	0.7768	0.7834	0.7900	0.7967	0.8033	0.8099	0.8166	0.8232	0.8303	0.8418	0.8527	0.8600	0.8600	0.8600	0.8600	0.8600	0.8600	0.8600	0.8600	0.8600	0.8600
P' 2-3	0.4854	0.5111	0.5369	0.5626	0.5884	0.6141	0.6399	0.6656	0.6914	0.7173	0.7446	0.7572	0.7699	0.7699	0.7699	0.7699	0.7699	0.7699	0.7699	0.7699	0.7699	0.7699
P' 2-4	0.5588	0.5671	0.5755	0.5841	0.5930	0.6018	0.6106	0.6195	0.6286	0.6378	0.6525	0.6629	0.6723	0.6723	0.6723	0.6723	0.6723	0.6723	0.6723	0.6723	0.6723	0.6723
P' 2-5	0.4183	0.4252	0.4320	0.4388	0.4456	0.4525	0.4593	0.4661	0.4729	0.4805	0.4953	0.5041	0.5137	0.5137	0.5137	0.5137	0.5137	0.5137	0.5137	0.5137	0.5137	0.5137
P' 3-4	-0.2166	-0.2166	-0.2166	-0.2166	-0.2166	-0.2166	-0.2166	-0.2166	-0.2166	-0.1981	-0.1842	-0.1493	-0.1195	-0.0896	-0.0598	-0.0300	-0.0002	0.0296	0.0595	0.0893	0.1191	0.1491
P' 4-5	-0.7111	-0.7111	-0.7111	-0.7111	-0.7111	-0.7111	-0.7111	-0.7111	-0.7111	-0.6976	-0.6834	-0.6532	-0.6349	-0.6167	-0.5984	-0.5805	-0.5625	-0.5445	-0.5278	-0.5130	-0.4981	-0.4831
P' 4-7	0.1691	0.1927	0.2164	0.2400	0.2636	0.2873	0.3110	0.3369	0.3629	0.3891	0.4268	0.4362	0.4613	0.4613	0.4613	0.4613	0.4613	0.4613	0.4613	0.4613	0.4613	0.4613
P' 4-9	0.0970	0.1106	0.1241	0.1377	0.1513	0.1648	0.1784	0.1933	0.2082	0.2232	0.2449	0.2503	0.2647	0.2647	0.2647	0.2647	0.2647	0.2647	0.2647	0.2647	0.2647	0.2647
P' 5-6	0.3558	0.3737	0.3917	0.4096	0.4275	0.4455	0.4634	0.4814	0.5022	0.5320	0.5747	0.5861	0.6134	0.6134	0.6134	0.6134	0.6134	0.6134	0.6134	0.6134	0.6134	0.6134
P' 6-11	-0.0205	-0.0094	0.0016	0.0127	0.0238	0.0348	0.0459	0.0569	0.0680	0.0791	0.0953	0.1000	0.1112	0.1112	0.1112	0.1112	0.1112	0.1112	0.1112	0.1112	0.1112	0.1112
P' 6-12	0.0145	0.0233	0.0329	0.0424	0.0519	0.0616	0.0715	0.0815	0.0914	0.1018	0.1124	0.1148	0.1242	0.1242	0.1242	0.1242	0.1242	0.1242	0.1242	0.1242	0.1242	0.1242
P' 6-13	0.0490	0.0677	0.0872	0.1066	0.1260	0.1460	0.1668	0.1876	0.2085	0.2310	0.2543	0.2599	0.2783	0.2783	0.2783	0.2783	0.2783	0.2783	0.2783	0.2783	0.2783	0.2783
P' 7-8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P' 7-9	0.1691	0.1927	0.2164	0.2400	0.2636	0.2873	0.3110	0.3369	0.3629	0.3891	0.4268	0.4362	0.4613	0.4613	0.4613	0.4613	0.4613	0.4613	0.4613	0.4613	0.4613	0.4613
P' 9-10	-0.0058	0.0022	0.0101	0.0181	0.0261	0.0340	0.0420	0.0500	0.0579	0.0659	0.0869	0.0928	0.0955	0.0955	0.0955	0.0955	0.0955	0.0955	0.0955	0.0955	0.0955	0.0955
P' 9-14	0.0084	0.0211	0.0339	0.0466	0.0593	0.0720	0.0847	0.0974	0.1101	0.1228	0.1439	0.1497	0.1633	0.1633	0.1633	0.1633	0.1633	0.1633	0.1633	0.1633	0.1633	0.1633
P' 10-11	-0.0598	-0.0598	-0.0598	-0.0598	-0.0598	-0.0598	-0.0598	-0.0598	-0.0598	-0.0598	-0.0475	-0.0428	-0.0302	-0.0222	-0.0143	-0.0063	0.0017	0.0096	0.0176	0.0256	0.0335	0.0415
P' 12-13	-0.0652	-0.0652	-0.0652	-0.0652	-0.0558	-0.0451	-0.0342	-0.0229	-0.0083	0.0062	0.0210	0.0233	0.0338	0.0389	0.0440	0.0490	0.0541	0.0592	0.0643	0.0692	0.0741	0.0790
P' 13-14	-0.0521	-0.0403	-0.0285	-0.0167	-0.0049	0.0069	0.0187	0.0305	0.0423	0.0543	0.0743	0.0792	0.0902	0.0902	0.0902	0.0902	0.0902	0.0902	0.0902	0.0902	0.0902	0.0902

Tabela B.18 – Resultados para as distribuições de possibilidade da potência activa injectada (pu) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo DC CFPF para a rede de 14 barramentos do Capítulo 4, secção 4.4.1

P'i	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
P'1	2.4439	2.4555	2.4670	2.4786	2.4902	2.5018	2.5133	2.5249	2.5365	2.5481	2.5596	2.5854	2.5969	2.6040	2.6040	2.6040	2.6040	2.6040	2.6040	2.6040	2.6040	2.6040
P'2	0.0328	0.0474	0.0620	0.0766	0.0912	0.1058	0.1204	0.1350	0.1496	0.1642	0.1788	0.1872	0.2018	0.2164	0.2310	0.2456	0.2602	0.2748	0.2894	0.3040	0.3186	0.3332
P'3	-0.9865	-0.9865	-0.9865	-0.9865	-0.9865	-0.9865	-0.9865	-0.9865	-0.9865	-0.9865	-0.9865	-0.9514	-0.9326	-0.8770	-0.8214	-0.7658	-0.7103	-0.6547	-0.5991	-0.5435	-0.4880	-0.4324
P'4	-0.7648	-0.7366	-0.7084	-0.6802	-0.6520	-0.6238	-0.5956	-0.5674	-0.5392	-0.5110	-0.4828	-0.4732	-0.4450	-0.4168	-0.3886	-0.3604	-0.3322	-0.3040	-0.2758	-0.2476	-0.2194	-0.1912
P'5	-0.1216	-0.1171	-0.1126	-0.1081	-0.1037	-0.0992	-0.0947	-0.0902	-0.0857	-0.0812	-0.0768	-0.0752	-0.0708	-0.0663	-0.0618	-0.0573	-0.0528	-0.0483	-0.0439	-0.0394	-0.0349	-0.0304
P'6	-0.1792	-0.1726	-0.1660	-0.1594	-0.1528	-0.1462	-0.1396	-0.1329	-0.1263	-0.1197	-0.1131	-0.1109	-0.1043	-0.0977	-0.0911	-0.0844	-0.0778	-0.0712	-0.0646	-0.0580	-0.0514	-0.0448
P'7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P'8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P'9	-0.7086	-0.6896	-0.6705	-0.6514	-0.6323	-0.6131	-0.5940	-0.5749	-0.5558	-0.5350	-0.4469	-0.4381	-0.3943	-0.3505	-0.3067	-0.2628	-0.2190	-0.1752	-0.1314	-0.0876	-0.0445	-0.0073
P'10	-0.1553	-0.1553	-0.1553	-0.1553	-0.1553	-0.1553	-0.1553	-0.1553	-0.1523	-0.1443	-0.1363	-0.1337	-0.1257	-0.1177	-0.1098	-0.1018	-0.0938	-0.0859	-0.0779	-0.0699	-0.0620	-0.0540
P'11	-0.0840	-0.0809	-0.0778	-0.0747	-0.0716	-0.0685	-0.0654	-0.0623	-0.0592	-0.0561	-0.0530	-0.0520	-0.0489	-0.0458	-0.0427	-0.0396	-0.0365	-0.0334	-0.0303	-0.0272	-0.0241	-0.0210
P'12	-0.1894	-0.1894	-0.1894	-0.1894	-0.1800	-0.1693	-0.1584	-0.1470	-0.1288	-0.1106	-0.0924	-0.0906	-0.0815	-0.0725	-0.0634	-0.0544	-0.0453	-0.0362	-0.0272	-0.0181	-0.0091	0.0000
P'13	-0.3956	-0.3838	-0.3720	-0.3593	-0.3424	-0.3255	-0.3086	-0.2918	-0.2749	-0.2448	-0.2045	-0.2005	-0.1804	-0.1604	-0.1403	-0.1203	-0.1002	-0.0802	-0.0601	-0.0401	-0.0200	0.0000
P'14	-0.2535	-0.2535	-0.2535	-0.2535	-0.2535	-0.2535	-0.2535	-0.2535	-0.2521	-0.2389	-0.2257	-0.2213	-0.2081	-0.1949	-0.1817	-0.1685	-0.1553	-0.1421	-0.1290	-0.1158	-0.1026	-0.0894

Tabela B.19 – Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência aparente (pu) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo AC SFPF para a rede de 14 barramentos do Capítulo 4, secção 4.5.1

Sik	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
1-2	1.6685	1.6876	1.7068	1.7260	1.7452	1.7643	1.7836	1.8029	1.8222	1.8416	1.8613	1.8835	1.9025	1.9212	1.9400	1.9587	1.9775	1.9963	2.0151	2.0339	2.0527	2.0715
1-5	0.7561	0.7707	0.7854	0.8000	0.8147	0.8294	0.8441	0.8587	0.8733	0.8879	0.9032	0.9149	0.9312	0.9465	0.9619	0.9773	0.9927	1.0081	1.0236	1.0390	1.0544	1.0698
2-3	0.4872	0.5162	0.5454	0.5749	0.6044	0.6341	0.6639	0.6938	0.7238	0.7538	0.7840	0.7978	0.8274	0.8571	0.8869	0.9166	0.9464	0.9761	1.0044	1.0321	1.0593	1.0863
2-4	0.4735	0.4925	0.5115	0.5308	0.5501	0.5693	0.5886	0.6079	0.6272	0.6466	0.6669	0.6778	0.6995	0.7199	0.7403	0.7608	0.7812	0.8017	0.8223	0.8428	0.8635	0.8841
2-5	0.3148	0.3340	0.3533	0.3726	0.3919	0.4113	0.4306	0.4501	0.4695	0.4891	0.5097	0.5192	0.5415	0.5623	0.5830	0.6038	0.6246	0.6454	0.6662	0.6869	0.7077	0.7285
3-4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0038	0.0307	0.0674	0.1048	0.1430	0.1825	0.1965	0.2369	0.2763	0.3158	0.3554	0.3951	0.4347	0.4742	0.5136	0.5530	0.5923
4-5	0.2886	0.3242	0.3607	0.3980	0.4358	0.4740	0.5127	0.5517	0.5910	0.6305	0.6717	0.6865	0.7198	0.7518	0.7838	0.8157	0.8475	0.8792	0.9109	0.9425	0.9740	1.0055
4-7	0.0154	0.0537	0.0930	0.1328	0.1727	0.2128	0.2531	0.2935	0.3340	0.3747	0.4159	0.4255	0.4813	0.5325	0.5836	0.6345	0.6852	0.7358	0.7862	0.8365	0.8866	0.9365
4-9	0.0181	0.0397	0.0614	0.0831	0.1048	0.1264	0.1481	0.1698	0.1915	0.2132	0.2353	0.2407	0.2726	0.3019	0.3312	0.3605	0.3896	0.4187	0.4476	0.4764	0.5052	0.5338
5-6	0.2038	0.2392	0.2776	0.3181	0.3599	0.4028	0.4463	0.4903	0.5348	0.5796	0.6246	0.6370	0.7000	0.7585	0.8166	0.8745	0.9322	0.9895	1.0464	1.1030	1.1591	1.2149
6-11	0.0240	0.0330	0.0422	0.0516	0.0613	0.0717	0.0829	0.0949	0.1079	0.1235	0.1413	0.1468	0.1663	0.1871	0.2093	0.2322	0.2558	0.2798	0.3041	0.3288	0.3535	0.3784
6-12	0.0151	0.0254	0.0361	0.0471	0.0582	0.0693	0.0805	0.0917	0.1029	0.1142	0.1254	0.1281	0.1477	0.1669	0.1861	0.2053	0.2245	0.2436	0.2627	0.2833	0.3029	0.3225
6-13	0.0592	0.0801	0.1028	0.1263	0.1502	0.1745	0.1988	0.2234	0.2480	0.2726	0.2973	0.3040	0.3431	0.3807	0.4184	0.4561	0.4939	0.5318	0.5697	0.6086	0.6476	0.6866
7-8	0.1739	0.1809	0.1879	0.1949	0.2018	0.2087	0.2157	0.2226	0.2295	0.2363	0.2432	0.2479	0.2547	0.2615	0.2683	0.2751	0.2819	0.2886	0.2954	0.3021	0.3088	0.3154
7-9	0.0916	0.1165	0.1470	0.1803	0.2150	0.2506	0.2867	0.3232	0.3599	0.3967	0.4338	0.4438	0.4965	0.5455	0.5947	0.6440	0.6936	0.7431	0.7926	0.8422	0.8919	0.9414
9-10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0050	0.0202	0.0356	0.0510	0.0776	0.0841	0.1095	0.1353	0.1616	0.1882	0.2152	0.2424	0.2697	0.2974	0.3253	0.3533
9-14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0153	0.0310	0.0473	0.0671	0.0898	0.1139	0.1390	0.1453	0.1736	0.2018	0.2303	0.2591	0.2881	0.3174	0.3470	0.3768	0.4068	0.4371
10-11	0.0000	0.0000	0.0017	0.0101	0.0185	0.0269	0.0353	0.0440	0.0534	0.0644	0.0788	0.0836	0.1012	0.1210	0.1423	0.1648	0.1878	0.2112	0.2363	0.2613	0.2866	0.3121
12-13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0031	0.0084	0.0170	0.0290	0.0313	0.0442	0.0573	0.0705	0.0837	0.0971	0.1104	0.1238	0.1371	0.1504	0.1638
13-14	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0108	0.0250	0.0406	0.0567	0.0760	0.0985	0.1039	0.1241	0.1452	0.1667	0.1885	0.2107	0.2330	0.2555	0.2783	0.3012	0.3241

Tabela B.20 – Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência aparente (pu) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo AC CFPF para a rede de 14 barramentos do Capítulo 4, secção 4.5.1

Sik	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
1-2	1.7481	1.7583	1.7686	1.7789	1.7893	1.7997	1.8101	1.8205	1.8309	1.8426	1.8613	1.8835	1.8930	1.8930	1.8930	1.8930	1.8930	1.8930	1.8930	1.8930	1.8930	1.8930
1-5	0.8274	0.8343	0.8413	0.8483	0.8552	0.8622	0.8692	0.8761	0.8831	0.8906	0.9032	0.9149	0.9230	0.9230	0.9230	0.9230	0.9230	0.9230	0.9230	0.9230	0.9230	0.9230
2-3	0.5091	0.5354	0.5618	0.5883	0.6154	0.6430	0.6707	0.6985	0.7264	0.7543	0.7840	0.7978	0.8120	0.8120	0.8120	0.8120	0.8120	0.8120	0.8120	0.8120	0.8120	0.8120
2-4	0.5721	0.5805	0.5888	0.5971	0.6055	0.6139	0.6226	0.6316	0.6407	0.6510	0.6669	0.6778	0.6880	0.6880	0.6880	0.6880	0.6880	0.6880	0.6880	0.6880	0.6880	0.6880
2-5	0.4306	0.4375	0.4443	0.4512	0.4580	0.4649	0.4718	0.4787	0.4857	0.4934	0.5097	0.5192	0.5300	0.5300	0.5300	0.5300	0.5300	0.5300	0.5300	0.5300	0.5300	0.5300
3-4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0255	0.0556	0.0859	0.1161	0.1465	0.1825	0.1965	0.2160	0.2160	0.2160	0.2160	0.2160	0.2160	0.2160	0.2160	0.2160	0.2160
4-5	0.4919	0.5063	0.5206	0.5349	0.5492	0.5635	0.5788	0.5974	0.6170	0.6368	0.6717	0.6865	0.7020	0.7020	0.7020	0.7020	0.7020	0.7020	0.7020	0.7020	0.7020	0.7020
4-7	0.1536	0.1737	0.1947	0.2193	0.2450	0.2708	0.2968	0.3231	0.3497	0.3766	0.4159	0.4255	0.4510	0.4510	0.4510	0.4510	0.4510	0.4510	0.4510	0.4510	0.4510	0.4510
4-9	0.0834	0.0968	0.1102	0.1238	0.1386	0.1534	0.1682	0.1833	0.1985	0.2138	0.2353	0.2407	0.2550	0.2550	0.2550	0.2550	0.2550	0.2550	0.2550	0.2550	0.2550	0.2550
5-6	0.4077	0.4248	0.4420	0.4593	0.4766	0.4940	0.5114	0.5290	0.5491	0.5799	0.6246	0.6370	0.6660	0.6660	0.6660	0.6660	0.6660	0.6660	0.6660	0.6660	0.6660	0.6660
6-11	0.0385	0.0470	0.0556	0.0644	0.0733	0.0822	0.0918	0.1021	0.1131	0.1246	0.1413	0.1468	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580	0.1580
6-12	0.0227	0.0319	0.0412	0.0505	0.0603	0.0708	0.0815	0.0922	0.1030	0.1141	0.1254	0.1282	0.1380	0.1380	0.1380	0.1380	0.1380	0.1380	0.1380	0.1380	0.1380	0.1380
6-13	0.0765	0.0969	0.1174	0.1380	0.1588	0.1805	0.2031	0.2258	0.2485	0.2726	0.2973	0.3040	0.3230	0.3230	0.3230	0.3230	0.3230	0.3230	0.3230	0.3230	0.3230	0.3230
7-8	0.1739	0.1809	0.1879	0.1949	0.2018	0.2087	0.2157	0.2226	0.2295	0.2363	0.2432	0.2479	0.2510	0.2510	0.2510	0.2510	0.2510	0.2510	0.2510	0.2510	0.2510	0.2510
7-9	0.1644	0.1889	0.2134	0.2380	0.2624	0.2890	0.3157	0.3428	0.3699	0.3973	0.4338	0.4438	0.4686	0.4690	0.4690	0.4690	0.4690	0.4690	0.4690	0.4690	0.4690	0.4690
9-10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0071	0.0166	0.0261	0.0357	0.0454	0.0557	0.0776	0.0841	0.0870	0.0870	0.0870	0.0870	0.0870	0.0870	0.0870	0.0870	0.0870	0.0870
9-14	0.0000	0.0047	0.0182	0.0318	0.0454	0.0592	0.0729	0.0868	0.1007	0.1156	0.1390	0.1453	0.1600	0.1600	0.1600	0.1600	0.1600	0.1600	0.1600	0.1600	0.1600	0.1600
10-11	0.0000	0.0014	0.0093	0.0171	0.0249	0.0327	0.0405	0.0487	0.0573	0.0661	0.0788	0.0836	0.0950	0.0950	0.0950	0.0950	0.0950	0.0950	0.0950	0.0950	0.0950	0.0950
12-13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0041	0.0086	0.0170	0.0290	0.0313	0.0408	0.0459	0.0510	0.0558	0.0605	0.0651	0.0694	0.0710	0.0710	0.0710
13-14	0.0000	0.0000	0.0010	0.0105	0.0201	0.0303	0.0412	0.0527	0.0647	0.0773	0.0985	0.1039	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150	0.1150

Tabela B.21 – Resultados para as distribuições de possibilidade da potência activa injectada (pu) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo AC CFPF para a rede de 14 barramentos do Capítulo 4, secção 4.5.1

	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
P1'	2.6218	2.6342	2.6466	2.6591	2.6715	2.6839	2.6963	2.7087	2.7212	2.7336	2.7460	2.7736	2.7860	2.7942	2.7943	2.7944	2.7945	2.7946	2.7947	2.7947	2.7948	2.7949
P2'	0.0328	0.0474	0.0620	0.0766	0.0912	0.1058	0.1204	0.1350	0.1496	0.1642	0.1788	0.1872	0.2018	0.2164	0.2310	0.2456	0.2602	0.2748	0.2894	0.3040	0.3186	0.3332
P3'	-0.9952	-0.9947	-0.9941	-0.9934	-0.9927	-0.9920	-0.9912	-0.9903	-0.9894	-0.9884	-0.9514	-0.9326	-0.8770	-0.8214	-0.7658	-0.7103	-0.6547	-0.5991	-0.5435	-0.4880	-0.4324	-0.3768
P4'	-0.7648	-0.7366	-0.7084	-0.6802	-0.6520	-0.6238	-0.5956	-0.5674	-0.5392	-0.5110	-0.4828	-0.4732	-0.4450	-0.4168	-0.3886	-0.3604	-0.3322	-0.3040	-0.2758	-0.2476	-0.2194	-0.1912
P5'	-0.1216	-0.1171	-0.1126	-0.1081	-0.1037	-0.0992	-0.0947	-0.0902	-0.0857	-0.0812	-0.0768	-0.0752	-0.0708	-0.0663	-0.0618	-0.0573	-0.0528	-0.0483	-0.0439	-0.0394	-0.0349	-0.0304
P6'	-0.1792	-0.1726	-0.1660	-0.1594	-0.1528	-0.1462	-0.1396	-0.1329	-0.1263	-0.1197	-0.1131	-0.1109	-0.1043	-0.0977	-0.0911	-0.0844	-0.0778	-0.0712	-0.0646	-0.0580	-0.0514	-0.0448
P7'	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P8'	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
P9'	-0.7511	-0.7314	-0.7115	-0.6914	-0.6710	-0.6496	-0.6279	-0.6058	-0.5806	-0.5350	-0.4469	-0.4381	-0.3943	-0.3505	-0.3067	-0.2628	-0.2190	-0.1752	-0.1314	-0.0876	-0.0438	0.0000
P10'	-0.1783	-0.1772	-0.1760	-0.1745	-0.1730	-0.1712	-0.1682	-0.1602	-0.1523	-0.1443	-0.1364	-0.1337	-0.1257	-0.1177	-0.1098	-0.1018	-0.0938	-0.0859	-0.0779	-0.0699	-0.0620	-0.0540
P11'	-0.0840	-0.0809	-0.0778	-0.0747	-0.0716	-0.0685	-0.0654	-0.0623	-0.0592	-0.0561	-0.0530	-0.0520	-0.0489	-0.0458	-0.0427	-0.0396	-0.0365	-0.0334	-0.0303	-0.0272	-0.0241	-0.0210
P12'	-0.2026	-0.2005	-0.1930	-0.1833	-0.1736	-0.1638	-0.1538	-0.1436	-0.1288	-0.1106	-0.0924	-0.0906	-0.0815	-0.0725	-0.0634	-0.0544	-0.0453	-0.0362	-0.0272	-0.0181	-0.0091	0.0000
P13'	-0.4324	-0.4189	-0.4049	-0.3876	-0.3686	-0.3492	-0.3294	-0.3092	-0.2851	-0.2448	-0.2045	-0.2005	-0.1804	-0.1604	-0.1403	-0.1203	-0.1002	-0.0802	-0.0601	-0.0401	-0.0200	0.0000
P14'	-0.2669	-0.2663	-0.2655	-0.2647	-0.2637	-0.2627	-0.2616	-0.2604	-0.2521	-0.2389	-0.2257	-0.2213	-0.2081	-0.1949	-0.1817	-0.1685	-0.1553	-0.1421	-0.1290	-0.1158	-0.1026	-0.0894

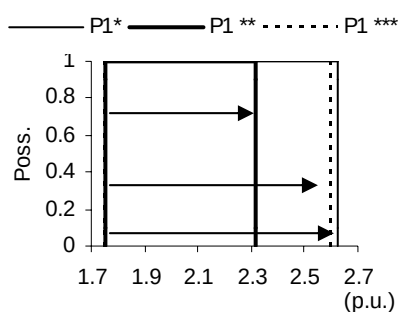


Figura B.9 – Distribuição rectangular para a potência injectada no barramento 1 nas situações de: caso base (P1*); contingência 5 - ramo 2-5 - (P1**); reforço do ramo 2-4 em 0.78 pu na situação de contingência 5 (P1***): Capítulo 5, secção 5.4.2

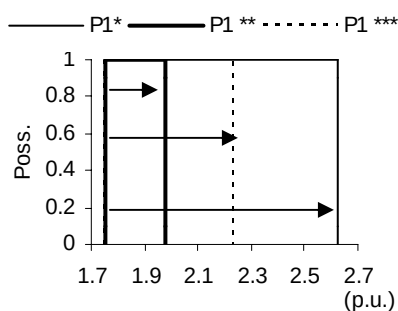


Figura B.10 – Distribuição rectangular para a potência injectada no barramento 1 nas situações de: caso base (P1*); contingência 7 - ramo 4-5 - (P1**); reforço do ramo 2-4 em 0.78 pu na situação de contingência 7 (P1***): Capítulo 5, secção 5.4.2

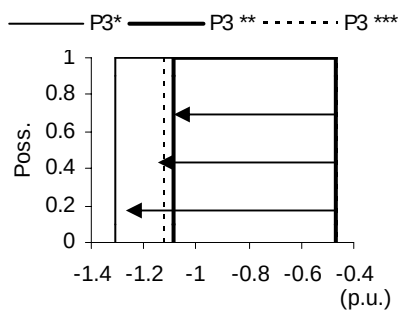


Figura B.11 – Distribuição rectangular para a potência injectada no barramento 3 nas situações de: caso base (P3*); contingência 7 - ramo 4-5 - (P3**); reforço do ramo 2-4 em 0.78 pu na situação de contingência 7 (P3***): Capítulo 5, secção 5.4.2

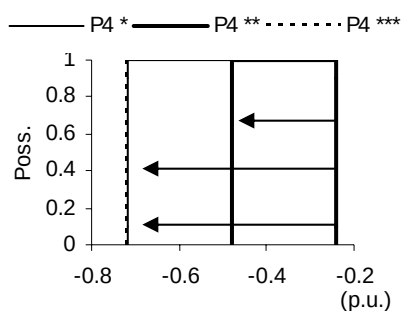


Figura B.12 – Distribuição rectangular para a potência injectada no barramento 4 nas situações de: caso base (P4*); contingência 7 - ramo 4-5 - (P4); reforço do ramo 2-4 em 0.78 pu na situação de contingência 7 (P4 ***): Capítulo 5, secção 5.4.2**

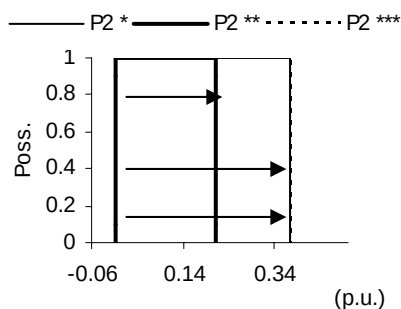


Figura B.13 – Distribuição rectangular para a potência injectada no barramento 2 nas situações de: caso base (P2*); contingência 7 - ramo 4-5 - (P2); reforço do ramo 2-4 em 0.78 pu na situação de contingência 7 (P2 ***): Capítulo 5, secção 5.4.2**

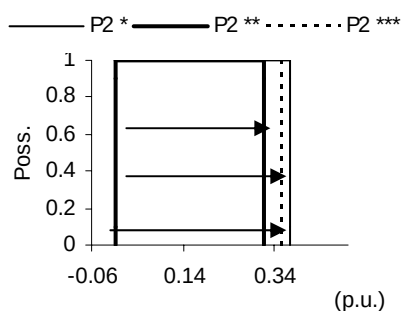


Figura B.14 – Distribuição rectangular para a potência injectada no barramento 2 nas situações de: caso base (P2*); contingência 2 - ramo 1-5 (P2); reforço do ramo 2-4 em 0.78 pu e situação de contingência 2 (P2 ***): Capítulo 5, secção 5.4.2**

**ARTIGOS CIENTÍFICOS PUBLICADOS NO ÂMBITO DA
DISSERTAÇÃO**

REVISTAS INTERNACIONAIS

Gouveia E M, Matos M A, "Symmetric AC Fuzzy Power Flow Model", European Journal of Operational Research, DOI: 10.1016/j.ejor.2007.12.044, 2008

Matos M A, Gouveia E M, "Fuzzy Power Flow Revisited", Power Systems, IEEE Transactions on, Volume 23, Issue 1, Page(s):213 – 218, February 2008

CONFERÊNCIAS INTERNACIONAIS

Gouveia E M, Matos M A, "Constrained Fuzzy Power Flow", in Proceedings of IEEE PowerTech 2007, pp. 1314-1319, Lausanne, Switzerland, June 2007

Gouveia E, Matos M A, "Detailed Calculation of Fuzzy Power Flow", Proceedings of the ORMMES 2006, Coimbra, September 2006

Matos M A, Gouveia E M, The Fuzzy Power Flow Revisited, in Proceedings of IEEE PowerTech 2005, Saint Petersburg, June 2005