

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**Trânsito de Potência DC Difuso com Despacho
Incorporado**

José Pedro Barreira Iria

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Manuel António Cerqueira da Costa Matos

Porto, Julho de 2011

José Pedro Iria, 2011

Resumo

Nesta dissertação são apresentados os resultados de um trabalho de investigação desenvolvido com o objectivo de obter um novo modelo para o trânsito de potências difuso.

As metodologias de trânsitos de potência difusos partem do pressuposto que a produção é independente do consumo, ou seja, não consideram as dependências económicas entre produção e consumo. De modo a incluir estas dependências desenvolveu-se um novo modelo de trânsito de potências difuso, onde as dependências entre produção e consumo resultam da condição de optimização do despacho óptimo, com base no pressuposto de que, para cada realização das incertezas das cargas, a produção será optimizada (minimização de custos de produção).

Desenvolveu-se e testou-se esta nova metodologia e comparou-se os resultados com as versões de trânsito de potências difuso que pressupõem independências. Para este efeito utilizou-se a rede de teste do IEEE de 14 barramentos. A modelização foi feita sobre o modelo linearizado do trânsito de potências (modelo DC).

Os resultados obtidos pela aplicação desta metodologia são animadores e mostram que as dependências económicas entre produção e consumo condicionam os resultados dos trânsitos de potência difusos.

Abstract

This dissertation presents the results of research work developed with the aim of obtaining a new model for the fuzzy power flow.

The methodologies of fuzzy power flows have the assumption that production is independent of load, i.e., does not consider the economic dependencies between production and load. By including these dependencies a new model of fuzzy power flow was developed, in which the dependencies between production and load resulting from the optimization condition of the optimal dispatch, based on the assumption that, for every instance of uncertainty of the loads the production will be optimized, thus minimizing production costs.

We developed and tested this new methodology and compared the results with the fuzzy power flow versions that assume independence. For this purpose we used a test network of IEEE 14 bus. The modeling was based on the linearized power flow model (DC model).

The results obtained by applying this methodology are encouraging and show that the economic dependencies between economic production and load affect the results of fuzzy power flows.

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 à minha família, em particular à minha falecida mãe, Maria, pelo amor e apoio que sempre me deu. Ao meu pai, José, minha irmã Ana e irmão João pelo apoio e incentivo constante dado ao longo do trabalho.

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

Finalmente, uma palavra também para os meus amigos, que de uma forma ou de outra contribuíram, com sugestões, comentários ou simplesmente pelo apoio moral.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Índice	ix
Lista de figuras	xii
Lista de tabelas	xv
Abreviaturas e Símbolos	xvi
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Estrutura da dissertação	3
Capítulo 2	4
Metodologias de cálculo do trânsito de potências	4
2.1. Introdução	4
2.2. Modelos determinísticos de trânsitos de potência.....	5
2.2.1. Modelo AC.....	5
2.2.2. Modelo DC.....	7
2.3. Modelos possibilísticos de trânsitos de potência	10
2.3.1. Teoria dos conjuntos difusos	11
2.3.1.1. Interface linguística	13
2.3.2. Formulação tradicional do trânsito de potência difuso (FPF)	16

2.3.3. Especificação das potências injectadas	17
2.3.4. Modelo tradicional do trânsito de potências DC difuso (DC FPF)	18
2.3.4.1. Exemplo ilustrativo do FPF.....	21
2.3.5. A assimetria no FPF e variantes do modelo.....	23
2.3.6. Trânsito de potência difuso simétrico (SFPF)	24
2.3.6.1. Congestionamento e repressão.....	24
2.3.6.2. Trânsito de potência DC difuso simétrico (DC SFPF)	27
2.3.6.3. Exemplo Ilustrativo comparando o FPF com o SFPF	29
2.3.6.4. Trânsito de potência DC difuso constrangido (DC CFPF).....	31
Capítulo 3	34
Despacho óptimo difuso	34
3.1. Introdução	34
3.2. Custos de produção	35
3.3. Despacho difuso básico (BFD)	36
3.3.1. Exemplo ilustrativo do BFD	39
3.4. Despacho económico impreciso (DEI)	40
3.4.1. Exemplo ilustrativo do DEI	43
Capítulo 4	45
Trânsito de potência difuso simétrico com despacho incorporado	45
4.1. Introdução	45
4.2. A questão das dependências.....	46
4.3. Trânsito de potência DC difuso simétrico com despacho incorporado (DC SFPFD)	48
4.3.1. Despacho óptimo difuso conjunto (DODC)	50
4.3.2. Optimização 2 (OPT2)	55
4.3.3. Exemplo ilustrativo do SFPFD	57
4.3.4. Exemplo ilustrativo comparando o SFPFD com o SFPF e o FPF	61
Capítulo 5	63
Estudo da rede de 14 barramentos do IEEE	63
5.1. Introdução	63
5.2. Dados da rede	65
5.3. Aplicação do SFPFD à rede.....	66
5.4. Comparação entre o SFPFD, o SFPF e o FPF	71
Capítulo 6	74
Conclusões e desenvolvimentos futuros	74
6.1. Síntese do trabalho desenvolvido e conclusões genéricas	74

6.2. Desenvolvimentos futuros.....	75
Referências bibliográficas	77
Anexo A	A-1
Anexo B	B-1

Lista de figuras

Figura 2.1 - Conjunto difuso "pessoas altas", representado pela sua função de pertença	12
Figura 2.2 - Representação da separação clássica (rígida) entre os elementos do conjunto "pessoas altas" e os que não lhe pertencem	13
Figura 2.3 - Número difuso rectangular (a), trapezoidal (b) e triangular (c)	14
Figura 2.4 - Representação gráfica de uma distribuição de possibilidade de um número difuso trapezoidal	14
Figura 2.5 - Representação gráfica de uma distribuição de possibilidade de um número difuso triangular	15
Figura 2.6 - Representação gráfica de uma distribuição de possibilidade de um número difuso rectangular	16
Figura 2.7 - Diagrama de blocos do FPF	17
Figura 2.8 - Rede de 3 barramentos, 3 ramos	19
Figura 2.9 - Rede de teste de 3 barramentos, 3 ramos (versão 1) - adaptado de [Saraiva, 1992]	21
Figura 2.10 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 2-3 (b)	22
Figura 2.11 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa no ramo 1-3..	22
Figura 2.12 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 2-3 (b)	22
Figura 2.13 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa no ramo 1-3..	23
Figura 2.14 - Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada entre os barramentos j e k, sem existência de congestionamento P'_{jk}	25
Figura 2.15 - Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada entre os barramentos i e k, com existência de congestionamento P'_{jk}	25
Figura 2.16 - Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada entre os barramentos j e k com existência de congestionamento - adaptado de [Gouveia, 2009]	26

Figura 2.17 - Distribuição de possibilidade para a potência activa de carga no barramento genérico.....	26
Figura 2.18 - Distribuição de possibilidade para a potência activa de produção no barramento genérico 7.....	27
Figura 2.19 - Rede de teste de 3 barramentos, 3 ramos (versão 2)	29
Figura 2.20 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 1-3 (b).....	30
Figura 2.21 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa no ramo 2-3..	30
Figura 2.22 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 1-3 (b).....	31
Figura 2.23 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa no ramo 2-3..	31
Figura 3.1 - Representação gráfica da curva de custo de produção típica de um gerador termoeléctrico.....	35
Figura 3.2 - Remoção de um número difuso trapezoidal	37
Figura 3.3 - Distribuição de possibilidade para a potência produzida nos geradores 1 (a) e 2 (b)	40
Figura 3.4 - Distribuição de possibilidade para a potência produzida no gerador 3	40
Figura 3.5 - Representação difusa da carga total	41
Figura 3.6 - Representação de um corte de nível α - adaptado de [Ferreira, 1999].....	42
Figura 3.7 - Representação difusa da nova carga total	42
Figura 3.8 - Representação difusa da carga total - adaptado de [Ferreira, 1999]	43
Figura 3.9 - Representação gráfica das produções de potência activa dos geradores 1, 2 e 3 - adaptado de [Ferreira, 1999]	44
Figura 4.1 - Despacho de um sistema de 3 geradores, para uma carga total [60,300] MW, calculado pelo SFPFD	46
Figura 4.2 - Distribuição de possibilidade dos geradores 1 e 2	47
Figura 4.3 - Distribuição de possibilidade da carga total	47
Figura 4.4 - Representação gráfica dos resultados do DODC	54
Figura 4.5 - Rede de teste de 3 barramentos, 3 ramos (versão 3)	57
Figura 4.6 - Representação difusa da carga total	58
Figura 4.7 - Representação gráfica das produções dos geradores 1 e 2 em função da carga .	59
Figura 4.8 - Distribuição de possibilidade para a potência produzida nos geradores 1 e 2	60
Figura 4.9 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 1-3 (b)	60

Figura 4.10 - Distribuição de possibilidade para trânsito de potência activa no ramo 2-3	60
Figura 4.11 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-3 (a) e 2-3 (b)	61
Figura 4.12 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa no ramo 1-2..	61
Figura 5.1 - Rede de teste IEEE 14 barramentos modificada, 20 ramos.....	63
Figura 5.2 - Diagrama de blocos	64
Figura 5.3 - Representação gráfica das produções dos geradores 1, 2 e 3 em função da carga.....	67
Figura 5.4 - Distribuição de possibilidade para a potência produzida nos geradores 1 (a) e 2 (b)	68
Figura 5.5 - Distribuição de possibilidade para a potência produzida no gerador 3	69
Figura 5.6 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 6-13 (b)	69
Figura 5.7 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 2-4 (a) e 4-5 (b)	69
Figura 5.8 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 2-3 .	70
Figura 5.9 - Distribuição de possibilidade para a fase nos barramentos 2 (a) e 4 (b)	70
Figura 5.10 - Distribuição de possibilidade para a fase nos barramentos 3 (a) e 9 (b)	71
Figura 5.11 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 1-5 (b)	71
Figura 5.12 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 2-3 (a) e 6-13 (b)	72
Figura 5.13 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 4-5 (a) e 2-4 (b)	72
Figura 5.14 - Distribuição de possibilidade para a fase nos barramentos 2 (a) e 3 (b)	73
Figura 5.15 - Distribuição de possibilidade para a fase nos barramentos 4(a) e 9 (b)	73

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Características dos geradores	39
Tabela 3.2 - Características dos geradores	43
Tabela 3.3 - Resultados obtidos para os diferentes geradores	43
Tabela 4.1 - Características dos geradores	58
Tabela 4.2 - Resultados obtidos para os diferentes geradores	58
Tabela 5.1 - Valores das cargas difusas triangulares	65
Tabela 5.2 - Dados dos ramos	65
Tabela 5.3 - Características dos geradores	66
Tabela 5.4 - Resultados obtidos para os diferentes geradores	66

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

BFD	Basic Fuzzy Dispatch
CFPF	Constrained Fuzzy Power Flow
DC FPF	DC Fuzzy Power Flow
DC SFPF	DC Symmetric Fuzzy Power Flow
DC SFPFD	DC Symmetric Fuzzy Power Flow with Dispatch
DEI	Despacho Económico Impreciso
DODC	Despacho Óptimo Difuso Conjunto
DPF	Deterministic Power Flow
FPF	Fuzzy Power Flow
FOPF	Fuzzy Optimal Power Flow
OPF	Optimal Power Flow
OPT2	Optimização 2
PPF	Probabilistic Power Flow
REF	Barramento de referência dos argumentos das tensões
SEE	Sistemas eléctricos de energia
SFPF	Symmetric Fuzzy Power Flow
SFPFD	Symmetric Fuzzy Power Flow with Dispatch
TP	Trânsito de Potência
TPD	Trânsito de Potência Difuso

Lista de símbolos

A	Matriz das sensibilidades
$A_{k,j}$	Elemento da matriz de sensibilidades, que relaciona a potência injectada na linha k com a potência injectada no barramento j
a_i, b_i, c_i	Constantes da função custo associadas ao gerador i , a_i é expresso em €/h, b_i , em €/h.MW e c_i em €/h.MW ²
B	Matriz das susceptâncias
B_{ji}	Elemento da linha j da coluna i da matriz das susceptâncias
G_{ji}	Elemento da linha j da coluna i da matriz das condutâncias
Q_{ji}	Trânsito de potência reactiva entre o barramento j e i
n	Número de geradores
$n\alpha$	Número de cortes de nível α
nb	Número de barramentos
nl	Número de linhas
P	Vector das potências injectadas (P_j)
\tilde{P}	Vector difuso das potências injectadas
$P(x)$	Função de pertença
P_{ji}	Trânsito de potência activa entre o barramento j e i
p^C	Carga total do sistema
$p^{C Max}$	Carga total máxima
$p^{C Min}$	Carga total mínima
P_j^C	Carga no barramento j
$\tilde{P}^C(\alpha)$	Carga total difusa do sistema para um nível de corte α
$P_j^{C Max}(\alpha)$	Carga máxima, no barramento j , para um nível de corte α
$P_j^{C Min}(\alpha)$	Carga mínima, no barramento j , para um nível de corte α
P_i^G	Potência produzida pelo gerador i
\tilde{P}_i^G	Potência difusa produzida pelo gerador i
$\tilde{P}_i^G(\alpha)$	Potência difusa produzida pelo gerador i , para um nível de corte α
$P_i^{G Min}$	Limite mínimo de produção do gerador i
$P_i^{G Max}$	Limite máximo de produção do gerador i
P_j^{Min}	Potência mínima injectada no barramento j
P_j^{Max}	Potência máxima injectada no barramento j
P_{LIM}	Máxima potência activa permitida no ramo k
P_L	Vector dos trânsitos de potência
\tilde{P}_L	Vector dos trânsitos de potência difusos
P_j	Potência injectada no barramento j

$P_j^{Max}(\alpha)$	Potência máxima injectada no barramento j, para um nível de corte α
$P_j^{Min}(\alpha)$	Potência mínima injectada no barramento j, para um nível de corte α
\tilde{P}_j^{final}	Potência difusa injectada no barramento j, permitida pela rede de transporte
$\tilde{P}_k(\alpha)$	Trânsito de potências difuso no ramo k, para um nível de corte α
$\tilde{P}_j(\alpha)$	Potência difusa injectada no barramento j, para um nível de corte α
R_{ji}	Resistência da linha, entre o barramento j e i
V_j	Tensão no barramento j
w	Frequência angular
X_{ji}	Reactância da linha, entre o barramento j e i
λ	Coefficiente de sensibilidade
α	Possibilidade
θ	Vector dos ângulos das tensões
θ_j	Ângulo da tensão no barramento j
$\tilde{\theta}$	Vector difuso dos ângulos das tensões
ΔP_j	Desvio de potência activa
ΔQ_j	Desvio de potência reactiva

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. 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.

A avaliação da adequação da rede pode ser feita através de uma ferramenta de análise de sistemas eléctricos, que encaixa na categoria dos trânsitos de potência difusos, onde a incerteza é modelizada através de números difusos. Estas metodologias partem do pressuposto que a produção é independente da carga, ou seja, consideram que as produções podem combinar-se de várias maneiras, de modo a satisfazer a carga total. Não consideram as questões económicas, associadas ao sistema produtor.

Na realidade existem dependências económicas entre produção e carga que devem ser consideradas, pois estas podem condicionar os resultados dos trânsitos de potência difusos. De modo a incluir estas dependências desenvolveu-se um novo modelo para o trânsito de potências difuso, onde as dependências entre produção e carga resultam da condição de optimização do despacho óptimo, considerando que para cada realização das incertezas das cargas, a produção será optimizada, minimizando os custos de produção.

1.2. Objectivos

O trabalho que deu origem a esta dissertação integra-se numa vasta área de investigação associada ao estudo de trânsitos de potência difusos e apresenta um objectivo global e vários objectivos específicos que se referem em seguida.

A dissertação vai centra-se no desenvolvimento de um modelo para o trânsito de potências difuso, onde as dependências entre produção e carga resultam da condição de optimização do despacho óptimo, com base no pressuposto de que, para cada realização das incertezas das cargas, a produção será optimizada (minimização de custos de produção). A modelização será feita sobre o modelo linearizado do trânsito de potências (modelo DC).

Os objectivos deste trabalho podem ser sintetizados da forma seguinte:

1. Desenvolver uma metodologia de trânsito de potências difuso, que incorpore dependências económicas entre produção e carga;
2. Testar a metodologia numa rede;
3. Comparar os resultados com as versões de trânsito de potências difuso que pressupõem independências.

1.3. Estrutura da dissertação

A estrutura desta dissertação está intrinsecamente relacionada com os objectivos apresentados e que estiveram presentes na realização do trabalho de investigação que lhe deu origem.

O Capítulo 2 trata o estado da arte no que se refere às ferramentas básicas de análise de sistemas eléctricos, em concretos os trânsitos de potência. Nesse contexto são identificadas as formulações para os modelos determinísticos e possibilísticos. São definidos alguns exemplos ilustrativos (utilizando uma pequena rede de 3 barramentos).

O Capítulo 3 trata o estado da arte no que se refere às ferramentas de cálculo do despacho óptimo difuso. São definidos alguns exemplos ilustrativos (utilizando um sistema de barramento único de 3 geradores).

No Capítulo 4 é apresentado o novo modelo para o trânsito de potências difuso. Este modelo considera as dependências económicas entre produção e carga. A modelização é feita sobre o modelo linearizado do trânsito de potências (modelo DC). São definidos alguns exemplos ilustrativos (utilizando uma pequena rede de 3 barramentos).

No Capítulo 5, a metodologia desenvolvida é aplicada a uma rede de 14 barramentos do IEEE. A metodologia proposta é comparada com as metodologias de trânsito de potências difuso que pressupõem independência.

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.

Capítulo 2

Metodologias de cálculo do trânsito de potências

2.1. Introdução

Os métodos de trânsito de potência 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 nos ramos e perdas.

As primeiras aplicações de trânsitos de potência surgiram na década de 50 [Ward e Hale, 1956] tendo sido a utilização do método de Newton-Raphson [Tiney 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. 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 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.

O segundo conjunto de modelos considerando incerteza, designa-se por trânsito de potência difuso. 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.

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.

2.2. Modelos determinísticos de trânsitos de potência

2.2.1. Modelo AC

Num estudo de trânsito de potência determinístico AC, 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:

$$P_j = g(V_j, \theta_j) \quad (2.1)$$

$$Q_j = h(V_j, \theta_j) \quad (2.2)$$

Onde:

$j = 1, \dots, nb$ barramentos;

P_j e Q_j são a potência activa e potência reactiva injectadas no barramento j ;

V_j e θ_j são a amplitude e o ângulo da tensão no barramento j .

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

$$P_j = V_j \sum_{i=1}^{nb} V_i (G_{ji} \cos \theta_{ji} + B_{ji} \sin \theta_{ji}) \quad (2.3)$$

$$Q_j = V_j \sum_{i=1}^{nb} V_i (G_{ji} \sin \theta_{ji} - B_{ji} \cos \theta_{ji}) \quad (2.4)$$

Onde:

B_{ji} - Elemento da linha j da coluna i da matriz das susceptâncias;

G_{ji} - Elemento da linha j da coluna i da matriz das condutâncias.

O problema consiste assim em encontrar os valores de tensões (módulo e fase) que satisfazem as equações (2.3) e (2.4). As expressões que exprimem o cálculo dos desvios de potência, correspondem a (2.5) para os barramentos PV e PQ e (2.6) para os barramentos PQ:

$$\Delta P_j = P_j^{sp} - P_j^{calc} = P_j^{sp} - P_j = V_j \sum_{i=1}^{nb} V_i (G_{ji} \cos \theta_{ji} + B_{ji} \sin \theta_{ji}) \quad (2.5)$$

$$\Delta Q_j = Q_j^{sp} - Q_j^{calc} = Q_j^{sp} - Q_j = V_j \sum_{i=1}^{nb} V_i (G_{ji} \sin \theta_{ji} - B_{ji} \cos \theta_{ji}) \quad (2.6)$$

onde *sp* e *calc* representam, respectivamente, as potências especificadas e as potências calculadas em cada iteração. Na solução óptima do problema do problema, (2.5) e (2.6) 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 vários métodos que podem ser utilizados na resolução desta etapa, destacando-se os seguintes:

- *Método de Gauss-Seidel* 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 (2.7) e (2.8) sendo

normalmente aceite que $D_1 = D_2 = D$. Tipicamente os valores (D) considerados para grandes sistemas são 1MW/Mvar.

$$|\Delta P_j| \leq D_1 \quad (2.7)$$

$$|\Delta Q_j| \leq D_2 \quad (2.8)$$

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 trânsito de potência permite obter (2.3-2.4) as potências injectadas no barramento de compensação em função dos valores das amplitudes e argumentos das tensões. Finalmente, a terceira etapa permite o cálculo dos trânsitos de potência nos ramos (2.9 - 2.10).

$$P_{ji} = V_j V_i (G_{ji} \cos \theta_{ji} + B_{ji} \sin \theta_{ji}) - V_j^2 G_{ji} \quad (2.9)$$

$$Q_{ji} = V_j V_i (G_{ji} \sin \theta_{ji} - B_{ji} \cos \theta_{ji}) + V_j^2 \left(B_{ji} - \frac{w C_{ji}}{2} V_i^2 \right) \quad (2.10)$$

onde, w e C_{ji} representam respectivamente a frequência angular e a admitância do modelo em π da linha j-i.

2.2.2. Modelo DC

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.

O Modelo DC permite linearizar as equações de trânsito de potência AC de Newton-Raphson, descrevendo uma relação entre a potência injectada e a tensão nos nós.

As equações básicas do trânsito de potência determinístico, modelo DC podem ser determinadas a partir do desenvolvimento das equações nodais.

$$P_j = \sum_{i \neq j} P_{ji} = \sum_{i \neq j} \frac{\theta_j - \theta_i}{X_{ji}} \quad (j = 1, \dots, nb) \quad (2.11)$$

$$P_j = \theta_j \cdot \sum_{i \neq j} \frac{1}{X_{ji}} = \sum_{i \neq j} \left(-\frac{1}{X_{ji}} \cdot \theta_i \right) \quad (2.12)$$

Definindo agora

$$B_{jj} = \sum_{i \neq j} \frac{1}{X_{ji}} \quad (2.13)$$

$$B_{ji} = -\frac{1}{X_{ji}} \quad (j \neq i) \quad (2.14)$$

A expressão anterior poderá escrever-se:

$$P_j = \sum_i (B_{ji} \cdot \theta_i) \quad (2.15)$$

Matricialmente,

$$[P] = [B] \cdot [\theta] \quad (2.16)$$

Onde:

nb - Número de barramentos;

P - Vector das potências injectadas;

θ - Vector dos ângulos das tensões;

B - Matriz das susceptâncias;

X_{ji} - Reactância da linha, entre o barramento j e i .

Como o determinante de B é nulo, o sistema de equações é indeterminado, reflectindo o facto de que é necessário definir a origem das fases. Fixando $\theta_{REF} = 0$ e eliminando uma equação (em geral a correspondente ao barramento de referência), obtém-se um sistema de equações resolúvel (2.17).

$$[\hat{P}] = [\hat{B}] \cdot [\hat{\theta}] \quad (2.17)$$

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 o barramento j e i são calculados, respectivamente por (2.18) e (2.19).

$$[\hat{\theta}] = [\hat{B}]^{-1} \cdot [\hat{P}] \quad (2.18)$$

$$P_{ji} = \frac{\theta_j - \theta_i}{X_{ji}} \quad (2.19)$$

Repare-se que o método apenas fornece valores para as fases das tensões e para os trânsitos de potência activa nos ramos. Os módulos das tensões são supostos, como se disse, iguais a 1 pu, e o trânsito de potência reactiva é desprezado. Não obstante estas limitações, o método é utilizado industrialmente, seja quando só se pretendem resultados aproximados (planeamento), seja quando é indispensável um modelo linear (certos problemas de optimização).

Por outro lado, chama-se a atenção para o facto de, se a rede não se alterar mas se quiserem estudar vários regimes de funcionamento (variação de cargas, diversos despachos), não ser necessário inverter novamente a matriz. Torna-se assim muito fácil realizar estudos sucessivos sobre a mesma rede.

Também é possível calcular directamente o trânsito de potência P_{ji} , com recurso à matriz de sensibilidades (A) que se define em (2.20), onde $A_{(j-i),y}$ relaciona a potência que transita no ramo j - i com a potência injectada no barramento i.

$$A_{(j-i),y} = \frac{Z_{jy} - Z_{iy}}{X_{ji}} \quad (2.20)$$

Sendo

$$[Z] = [\hat{B}]^{-1} \quad (2.21)$$

(Esta expressão é válida se j ou i coincidirem com o barramento de referência, se se fizer $Z_{REF,y} = 0$)

O trânsito de potência activa em cada ramo é determinado por:

$$[P_L] = [A] \cdot [P] \quad (2.22)$$

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.

Sobre a designação de modelo determinístico interessa referir que estes modelos são designados desta forma por não considerarem directamente incerteza nos dados de entrada do sistema eléctrico de energia. 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 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 vários cenários.

A necessidade de incluir incerteza em estudos de trânsito de potência levou à definição de novas metodologias. Matematicamente existem dois tipos principais de formulações considerando incerteza: os Trânsitos de Potência Probabilísticos e os Trânsitos de Potência Difusos (ou possibilísticos). A próxima secção vai focar os métodos possibilísticos.

2.3. Modelos possibilísticos de trânsitos de potência

Antes de passar a análise dos modelos de trânsito de potências difuso é importante fazer referência a alguns modelos probabilísticos que foram desenvolvidos ao longo dos anos.

A constatação de que a incerteza da carga influencia os resultados e conclusões do exercício dos trânsitos de potência 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, sendo este o primeiro método em que a incerteza da carga e da produção é considerada.

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. Em 83 [Allan e Leite da Silva, 1983] e mais tarde 90 [Leite da Silva et al, 1990] são apresentados novos desenvolvimentos do modelo probabilístico AC com o objectivo de alcançar melhores resultados. Outros trabalhos foram entretanto publicados; a título de exemplo podem citar-se [Allan e Billinton 2000; Hu e Wang, 2006].

No entanto, 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 proposições 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: planeamento de redes com cargas e produções difusas e problemas de decisão; trânsitos de potência [Miranda e Matos, 1989; Miranda et al, 1989a; Dimitrovsky e Tomsovic, 2004; Matos e Gouveia, 2005, 2008]; sistemas eléctricos em geral [Zimmermann,1991].

Nesta secção será dada uma especial relevância aos modelos de trânsito de potências difusos, que definem o âmbito de aplicação deste trabalho.

2.3.1. Teoria dos conjuntos difusos

A teoria dos conjuntos difusos foi proposta por Lotfi Zadeh, num artigo intitulado por "Fuzzy Sets". O aspecto mais fácil de se compreender na teoria dos conjuntos difusos é que ela substitui a lógica binária (verdadeiro - falso) da teoria dos conjuntos clássica, traduzida na álgebra de Boole, por uma lógica em que o grau de verdade de uma afirmação pode assumir um contínuo de valores entre 0 e 1 como, por exemplo, afirmar que $2.98 = 3$, embora com um grau de verdade de apenas 0.9, afirmação que não é estranha a engenheiros habituados a trabalhar com estimativas e arredondamentos.

Um outro aspecto importante é o que se refere à capacidade de a teoria dos conjuntos difusos poder representar expressões linguísticas qualitativas como, por exemplo, afirmar que um dado desvio de frequência em relação a um valor nominal é "negativo pequeno", em vez de se exprimir esta grandeza por um número real como -0.01 Hz.

O conceito fundamental associado à definição de um conjunto difuso é o conceito de "grau de pertença". Na teoria clássica dos conjuntos, com a sua lógica booleana ou bivalente, dado um universo e um conjunto A nele definido, estabelece-se uma relação de pertença relativamente a cada elemento x nesse universo, tal que dois casos se dão: ou x pertence a A ou x não pertence a A.

Dito de outro modo, poderíamos definir uma função de pertença

$$P_A \rightarrow \{0,1\} \text{ tal que } P_A(x) = \begin{cases} 0 & \Leftarrow x \notin A \\ 1 & \Leftarrow x \in A \end{cases} \quad (2.23)$$

ou seja, todos os elementos que pertençam a A têm valor de pertença 1 e todos os outros têm valor de pertença 0. Poderíamos também dizer que se aceita apenas um valor binário de verdade (verdadeiro ou falso) para uma afirmação do tipo "y pertence a A".

A teoria dos conjuntos difusos vem relaxar a restrição que condiciona P a assumir valores apenas no conjunto discreto $\{0, 1\}$; em vez disso, aceita-se que o valor de verdade ou

de pertença possa ser representado por um número real qualquer no intervalo unitário $[0, 1]$. Desta forma, dados dois elementos, poderemos ter que um se identifique mais com o conceito subjacente à formação do conjunto A do que outro. Por exemplo, poderemos ter x com valor de pertença 0.8 e y com valor de pertença de apenas 0.3 mas alguma coisa neles ainda estabelece uma ligação, em graus diferentes, com o conjunto A.

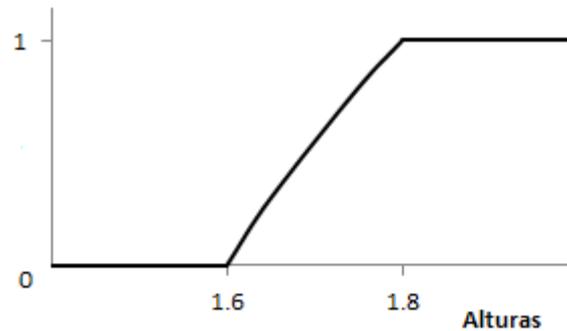


Figura 2.1 - Conjunto difuso "pessoas altas", representado pela sua função de pertinência

Dados quatro cidadãos e as respectivas alturas:

- António - 1,80 m
- João - 1,60 m
- Ana - 1,69 m
- Pedro - 1,73 m

Poderíamos pois relacioná-los com o conjunto das pessoas altas C mediante distintos valores de pertença a esse conjunto:

- António - 1,80 / 1.0
- João - 1,60 / 0.0
- Ana - 1,69 / 0.4
- Pedro - 1,73 / 0.85

Definitivamente, 1,60 m não é altura de pessoa alta e por isso o valor de pertença é zero. Por outro lado, 1,80 é inequivocamente a altura de uma pessoa alta e por isso o valor de pertença é 1. Os outros casos são intermédios. A figura 2.1 representa o conjunto difuso "pessoas altas" com o eixo das abcissas representando as alturas possíveis e o eixo das ordenadas representando o respectivo valor de pertença. Há quem represente um conjunto difuso só pela sua função de pertinência, e há que o represente pelo conjunto dos pares ordenados {elemento/valor de pertença}, em particular para conjuntos discretos.

Também se pode apreciar como a noção de conjunto difuso introduz uma 'suavidade' na transição entre os elementos que não se identificam com um conjunto e os elementos que se identificam.

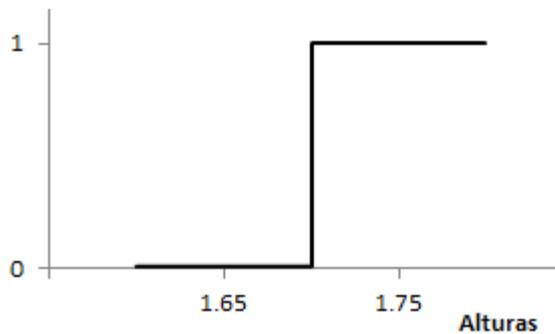


Figura 2.2 - Representação da separação clássica (rígida) entre os elementos do conjunto "pessoas altas" e os que não lhe pertencem

A forma clássica de representação, que seria definir um valor, por exemplo 1,70 m, para a fronteira entre uma pessoa não ser alta e sê-lo, é muito menos natural. Aprecie-se a figura 2.2 e compreenda-se porque é que a comunidade dos conjuntos difusos apelidou os conjuntos clássicos de 'conjuntos rígidos' (crisp sets).

Os conjuntos difusos revelam-se adequados para representar a incerteza associada ao carácter vago ou fluido de um conhecimento. O conjunto difuso apresentado na figura 2.1 possui um carácter vago ou fluido devido à existência de uma transição gradual e contínua entre os valores 0 e 1 da sua função de pertinência. Deste modo, é assegurado que o conjunto de valores não possui fronteiras bem definidas e determinísticas.

As regras operacionais associadas aos conjuntos difusos podem ser consideradas como uma generalização dos conceitos associados à análise intervalar. Com efeito, um conjunto difuso pode ser encarado como um conjunto de intervalos encaixados possuindo, cada um deles, um valor de pertinência.

2.3.1.1. Interface linguística

O desenvolvimento e implementação de uma interface linguística tendo por objectivo facilitar e tornar mais eficiente o processo de comunicação entre o utilizador e as aplicações computacionais revela-se importante. Este objectivo é particularmente relevante em estudos no qual se pretende incorporar conhecimentos expressos de forma qualitativa através de proposições da linguagem natural.

A forma mais simples de especificar o valor de potências produzidas ou de carga consiste em construir números difusos, de forma directa, a partir de proposições da linguagem natural. Geralmente são utilizados números difusos triangulares, trapezoidais ou rectangulares. A capacidade dos números difusos para descrever matematicamente declarações qualitativas sobre carga e produção é ilustrada na Figura 2.3.

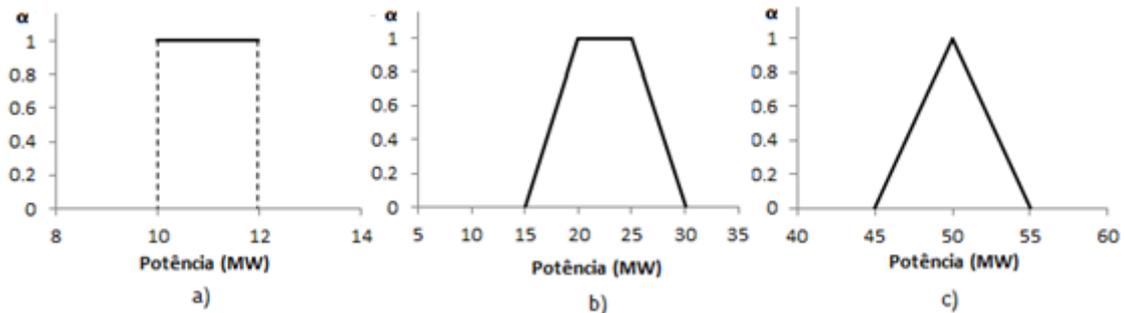


Figura 2.3 - Número difuso rectangular (a), trapezoidal (b) e triangular (c)

Na Figuras 2.3 acima estão presentes três situações: “carga entre 10 a 12 MW” (Figura 2.3a), “carga possivelmente entre 20 e 25 MW, mas poderá assumir valores entre 15 e 30 MW” (Figura 2.3b) e “produção de cerca de 50 MW” (Figura 2.3c).

Um número difuso é constituída por um conjunto de intervalos, correspondendo cada intervalo a um corte de nível α . Os cortes de nível α podem assumir valores entre $[0,1]$. Com a finalidade de exemplificar o que é um corte de nível α utilizou-se a Figura 2.3c. Para um corte de nível $\alpha = 0$, a potência é igual a $[45, 55]$. Para um corte de nível $\alpha = 0.5$, a potência é igual $[47.5, 52.5]$, enquanto para um corte de nível $\alpha = 1$, a potência é igual 50.

Um número difuso trapezoidal é caracterizado por um quarteto (a_1, a_2, a_3, a_4) sendo a sua função de pertença definida por (2.24). Na Figura 2.4 está representada a distribuição de possibilidade de um número difuso trapezoidal.

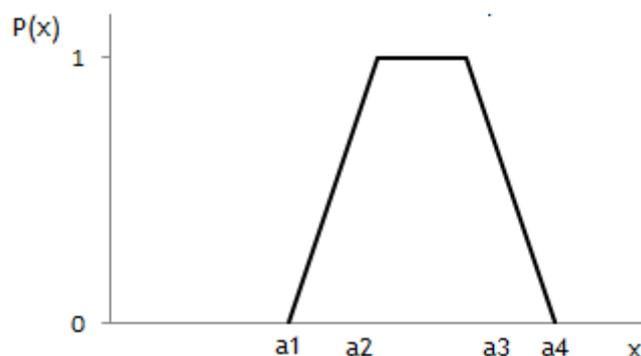


Figura 2.4 - Representação gráfica de uma distribuição de possibilidade de um número difuso trapezoidal

$$P(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & \text{se } a_1 \leq x < a_2 \\ 1, & \text{se } a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & \text{se } a_3 < x \leq a_4 \\ 0, & \text{se } x > a_4 \end{cases} \quad (2.24)$$

O corte de nível α , $A^{(\alpha)}$, para todo o α entre 0 e 1 e que caracteriza um número difuso trapezoidal é dado por (2.25).

$$A^{(\alpha)} = [a_1^{(\alpha)}, a_4^{(\alpha)}] = [(a_2 - a_1) \cdot \alpha + a_1, (a_3 - a_4) \cdot \alpha + a_4] \quad (2.25)$$

Podem ainda ser definidos os números difusos triangulares (Figura 2.5) e rectangulares (Figura 2.6).

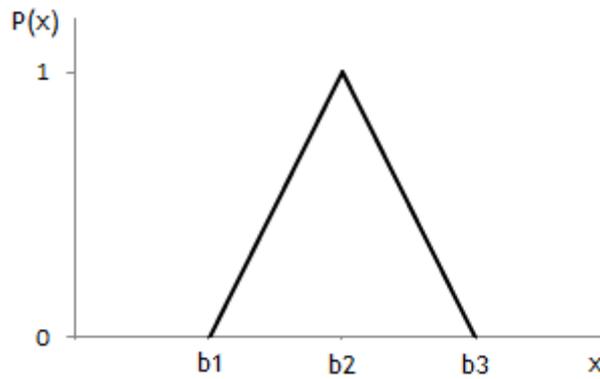


Figura 2.5 - Representação gráfica de uma distribuição de possibilidade de um número difuso triangular

Um número difuso triangular é caracterizado por um trio (b_1, b_2, b_3) sendo a sua função de pertinência definida por (2.26). O corte de nível α , $B^{(\alpha)}$, para todo o α entre 0 e 1 e que caracteriza um número difuso triangular é dado por (2.27). No que se refere aos números rectangulares (Figura 2.6) a mesma informação é dada por (2.28) e (2.29).

$$P(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < b_1 \\ \frac{x - b_1}{b_2 - b_1}, & \text{se } b_1 \leq x < b_2 \\ 1, & \text{se } x = b_2 \\ \frac{b_3 - x}{b_3 - b_2}, & \text{se } b_2 < x \leq b_3 \\ 0, & \text{se } x > b_3 \end{cases} \quad (2.26)$$

$$B^{(\alpha)} = [b_1^{(\alpha)}, b_3^{(\alpha)}] = [(b_2 - b_1) \cdot \alpha + b_1, (b_3 - b_2) \cdot \alpha + b_2] \quad (2.27)$$

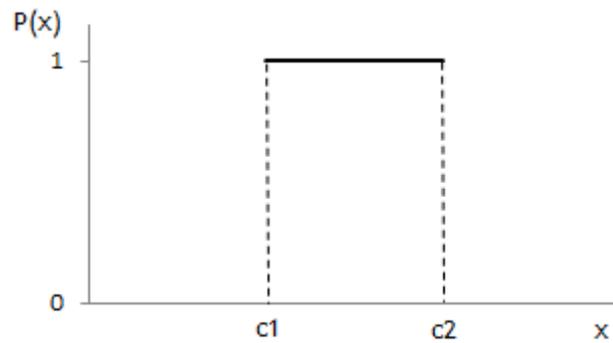


Figura 2.6 - Representação gráfica de uma distribuição de possibilidade de um número difuso rectangular

$$P(x) = \begin{cases} 0 & , se x < c_1 \\ 1 & , se c_1 \leq x \leq c_2 \\ 0 & , se x > c_2 \end{cases} \quad (2.28)$$

$$C^{(\alpha)} = [c_1^{(\alpha)}, c_2^{(\alpha)}] = [c_1, c_2] \quad (2.29)$$

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 $a_2=a_3$.

2.3.2. Formulação tradicional do trânsito de potência difuso (FPF)

O modelo tradicional do FPF pode ser descrito pelo seguinte diagrama de blocos (Figura 2.7).

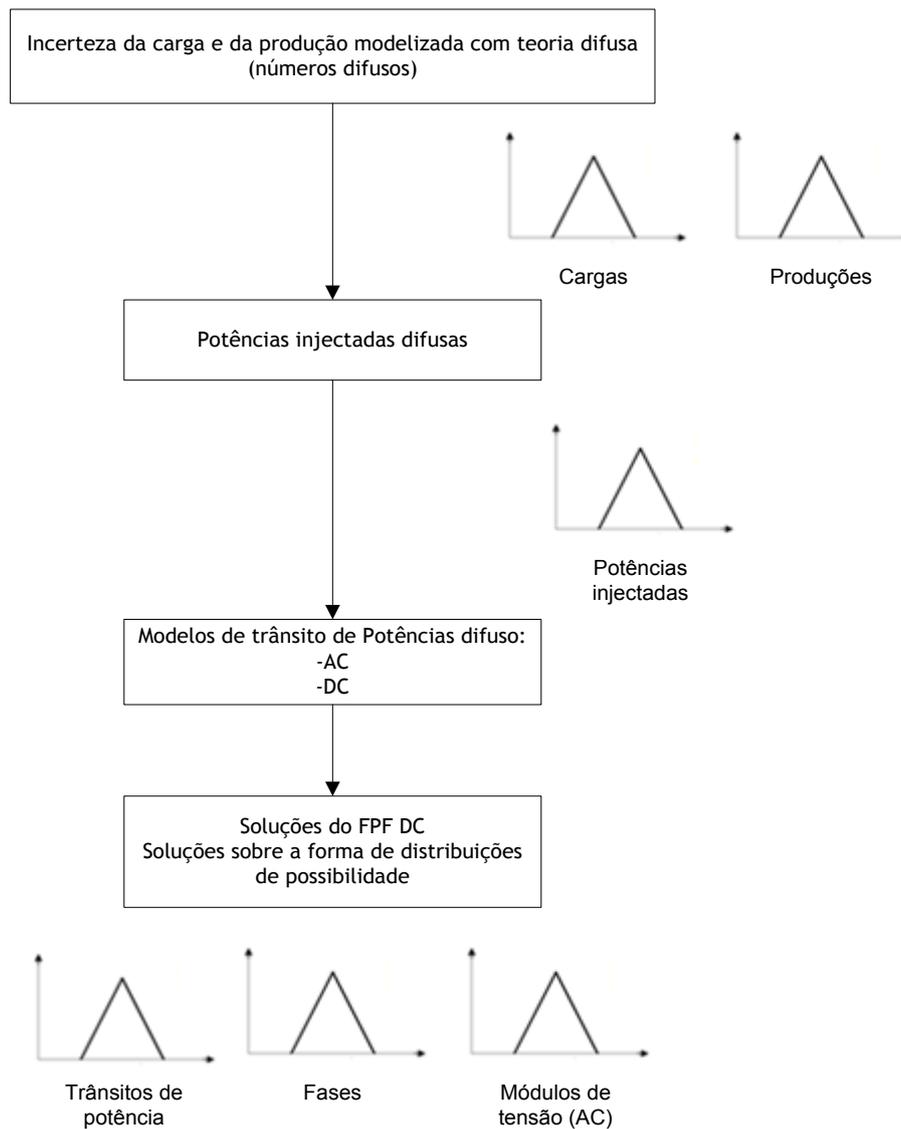


Figura 2.7 - Diagrama de blocos do FPF

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. O modelo DC será descrito na secção (2.3.4), enquanto o modelo AC não será abordado nesta dissertação, pois está fora do âmbito desta. Informação sobre o AC FPF pode ser encontrada em Saraiva [1992], ou Saraiva et al [2004].

2.3.3. Especificação das potências injectadas

No FPF, as variáveis de entrada (produção/carga) são números difusos. O resultado de cada variável de saída, como argumentos das tensões, 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 no FPF, as potências geradas e consumidas são agora distribuições de possibilidade em lugar de números determinísticos.

Na formulação clássica (FPF), a produção é independente da carga, ou seja, as produções dos geradores podem combinar-se entre si de várias maneiras, de modo a satisfazer a carga total do sistema. A dependência entre a produção e a carga será focada no capítulo 4.

No FPF, as potências injectadas são calculadas recorrendo a operações de subtracção com números difusos. Admitindo dois números difusos triangulares A (produção) e B (carga), a operação de subtracção que permite obter a potência activa difusa injectada P_j no barramento j, é dada por 2.30.

$$P_j = A - B = [a_1, a_2, a_3] - [b_1, b_2, b_3] = [a_1 - b_3, a_2 - b_2, a_3 - b_1] \quad (2.30)$$

Esta operação pode também ser aplicada aos números difusos trapezoidais ou rectangulares. 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.

2.3.4. Modelo tradicional do trânsito de potência DC difuso (DC FPF)

Miranda e Matos [1989] desenvolveram a primeira formulação do trânsito de potência difuso, após reconhecerem que os números difusos seriam a melhor forma de capturar a incerteza associada a cargas e produções futuras. A formulação era baseada no modelo DC. Neste modelo, se \tilde{P} é o vector difuso das potências injectadas nos barramentos, poderão ser obtidos os argumentos das tensões ($\tilde{\theta}$) utilizando (2.31). Fazendo uso da matriz das sensibilidades os trânsitos de potência difusos (\tilde{P}_L) poderão ser obtidos a partir de (2.32).

$$[\tilde{\theta}] = [B]^{-1} \cdot [\tilde{P}] \quad (2.31)$$

$$[\tilde{P}_L] = [A] \cdot [\tilde{P}] \quad (2.32)$$

onde A e B são respectivamente, as matrizes de sensibilidade e de susceptâncias do modelo DC tradicional de trânsitos de potência. Da equação matricial 2.32 pode-se deduzir que o valor difuso da potência activa no ramo k , é dado por:

$$\tilde{P}_k = \sum_{j \neq REF}^{nb} A_{k,j} \cdot \tilde{P}_j \quad (2.33)$$

Onde:

REF - Barramento de referência;

$A_{k,j}$ - Elemento da matriz de sensibilidades, que relaciona a potência injectada na linha k com a potência injectada no barramento j ;

nb - Número de barramentos.

Para uma rede de 3 barramentos (Figura 2.8), os trânsitos de potência difusos nos ramos 1-2, 1-3 e 2-3 são dados por 2.34, 2.35 e 2.36, respectivamente. A produção e a carga são representadas por números rectangulares (intervalos), sendo o barramento 1 escolhido como de referência.

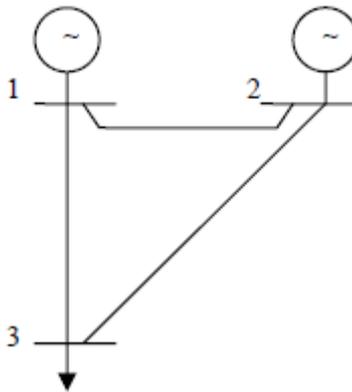


Figura 2.8 - Rede de 3 barramentos, 3 ramos

$$\tilde{P}_{1-2} = A_{1-2,2} \cdot [P_2^{Min}, P_2^{Max}] + A_{1-2,3} \cdot [P_3^{Min}, P_3^{Max}] \quad (2.34)$$

$$\tilde{P}_{1-3} = A_{1-3,2} \cdot [P_2^{Min}, P_2^{Max}] + A_{1-3,3} \cdot [P_3^{Min}, P_3^{Max}] \quad (2.35)$$

$$\tilde{P}_{2-3} = A_{2-3,2} \cdot [P_2^{Min}, P_2^{Max}] + A_{2-3,3} \cdot [P_3^{Min}, P_3^{Max}] \quad (2.36)$$

Estamos em condições de propor um pequeno algoritmo para o cálculo do trânsito de potência difuso.

Assumir

nb - número de barramentos

$j = 1$

Enquanto $j \leq nb$ **faça**

Se $j \neq REF$ **então**

$$P_k^{Max} = 0$$

$$P_k^{Min} = 0$$

Se $A_{k,j} \geq 0$ **então**

$$P_k^{Max} = A_{k,j} \cdot P_j^{Max} + P_k^{Max}$$

$$P_k^{Min} = A_{k,j} \cdot P_j^{Min} + P_k^{Min}$$

Fim de Se

Se $A_{k,j} < 0$ **então**

$$P_k^{Max} = A_{k,j} \cdot P_j^{Min} + P_k^{Max}$$

$$P_k^{Min} = A_{k,j} \cdot P_j^{Max} + P_k^{Min}$$

Fim de Se

$j = j+1$

Fim de Se

Fim de Enquanto

Onde:

P_j^{Min} - Potência mínima injectada no barramento j ;

P_j^{Max} - Potência máxima injectada no barramento j ;

P_k^{Min} - Trânsito de potência mínimo na linha k ;

P_k^{Max} - Trânsito de potência máximo na linha k ;

Quando a produção e a carga são representadas por números trapezoidais ou triangulares, o cálculo do trânsito de potência é efectuado para cada corte de nível α , no intervalo $[0, 1]$.

Os valores máximos e mínimos nem sempre correspondem aos trânsitos de potência máximos e mínimos globais. No FPF as potências podem combinar-se de várias maneiras, o que faz aumentar artificialmente a incerteza. Este aumento faz com que por vezes os valores máximos sejam superiores aos trânsitos de potência máximos globais.

2.3.4.1. Exemplo ilustrativo do FPF

Com a finalidade enunciada, utiliza-se a pequena rede de 3 barramentos da Figura 2.9 sendo a produção e a carga dada por números difusos triangulares e com reactância dos ramos igual a j 1.0 pu. Foi escolhido o barramento 1 para referência.

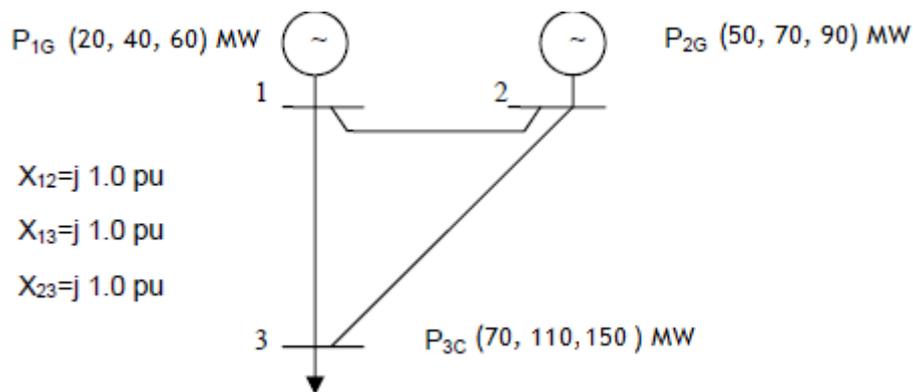


Figura 2.9 - Rede de teste de 3 barramentos, 3 ramos (versão 1) - adaptado de [Saraiva, 1992]

A matriz das sensibilidades (A), para a rede teste é dada por:

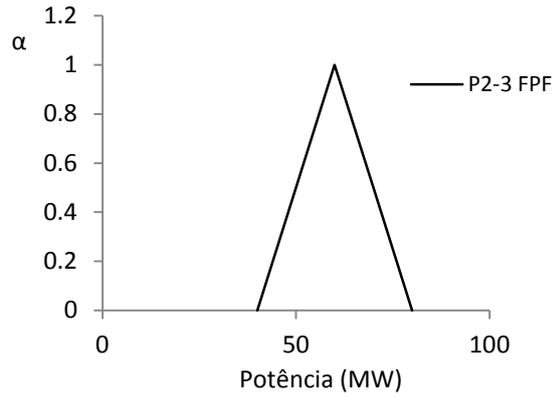
$$A = \begin{bmatrix} -0.67 & -0.33 \\ -0.33 & -0.67 \\ 0.33 & -0.33 \end{bmatrix} pu \quad (2.37)$$

As linhas 1,2 e 3 da matriz correspondem aos ramos 1-2, 1-3 e 3-2 respectivamente. A título de exemplo, vai-se calcular o trânsito de potência difuso no ramo 1-3 (\tilde{P}_{1-3}), para um corte de nível $\alpha=0$. Primeiro calcula-se o vector das potências injectadas difusas (2.38) e só depois o trânsito de potência (2.39), através de (2.35).

$$[\tilde{P}] = \begin{bmatrix} 20 & 60 \\ 50 & 90 \\ -150 & -70 \end{bmatrix} MW \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{1-3} &= -0.33 \cdot [50,90] - 0.67 \cdot [-150,-70] \\ &= [-29.7,-16.5] + [46.9,100.5] = [17.2,84] \end{aligned} \quad (2.39)$$

Os resultados dos trânsitos de potência difusos, encontram-se ilustrados nas Figuras 2.10 e 2.11.



a)

b)

Figura 2.10 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 2-3 (b)

Figura 2.11 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa no ramo 1-3

O exemplo seguinte continua a considerar distribuições triangulares e a rede da Figura 2.9, com a diferença de se escolher o barramento 2 como de referência.

a)

b)

Figura 2.12 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 2-3 (b)

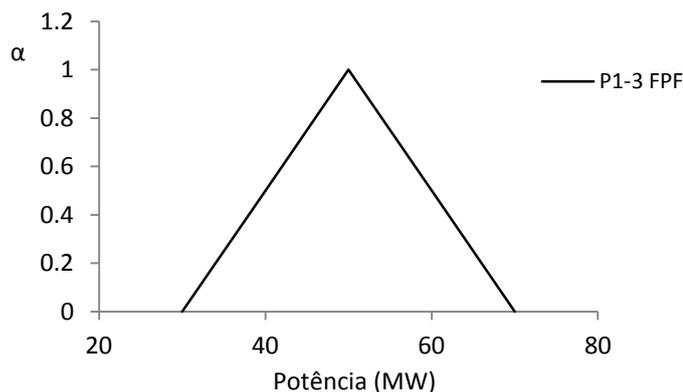


Figura 2.13 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa no ramo 1-3

Comparando a Figura 2.10b com 2.12b e 2.11 com 2.13, verifica-se que os resultados obtidos são diferentes. Isto mostra que a alteração do barramento de referência provoca mudanças nos trânsitos de potência difusos.

2.3.5. A assimetria no FPF e variantes do modelo

Na formulação DC tradicional [Miranda e Matos, 1989], 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, pode até ocorrer a obtenção de valores difusos de produção que ultrapassam os limites da capacidade do gerador. Este aspecto cria uma situação de assimetria, uma vez que o barramento de referência é tratado de forma distinta, ao não se ter em conta a sua potência de produção especificada. A assimetria reflecte-se na obtenção de resultados diferentes para os trânsitos de potência difusos, quando se altera o barramento de referência.

Com a finalidade de tratar este problema, mais tarde foram introduzidos procedimentos de correcção relativos à incerteza excessiva acumulada no barramento de compensação [Saraiva, 1992]. Nestas novas contribuições para o FPF, a produção no barramento de referência passa a estar limitada. No entanto, esta situação não resolve de forma definitiva o problema. De facto, apesar de se limitar a produção no barramento de referência, este continua a concentrar a incerteza resultante dos restantes barramentos do SEE até esse limite, mantendo-se uma situação de assimetria. O barramento de referência continua diferente dos restantes barramentos (na maior parte dos casos, produção difusa para este barramento, nem sequer é definida nos dados).

Em qualquer dos casos enunciados, o barramento de referência continua a ser tratado de uma forma diferente dos outros. 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 referência 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, posteriormente foram definidas metodologias por Matos e Gouveia [2005, 2008] capazes de tratar o problema.

2.3.6. Trânsito de potência difuso simétrico (SFPF)

Nesta secção é apresentada uma metodologia para os problemas de trânsito de potência que deriva directamente do princípio da extensão [Zadeh, 1965] e não gera 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 método é designado por *trânsito de potência difuso simétrico*.

A apresentação deste modelo será realizada para o problema linear (DC). Esta metodologia também foi desenvolvida para o modelo AC, mas como está fora do âmbito da dissertação não foi abordado. Informação sobre o modelo AC pode ser encontrada em Gouveia e Matos [2008].

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 de *trânsito de potência difuso constrangido*. Na língua inglesa [Matos e Gouveia, 2005, 2008; Gouveia e Matos, 2006, 2007] as formulações referidas são designadas, respectivamente por *Symmetric Fuzzy Power Flow (SFPF)* e *Constrained Fuzzy Power Flow (CFPF)*. Por uma questão de comodidade sempre que nos referirmos às metodologias no texto serão utilizadas as siglas respectivas na nomenclatura inglesa.

2.3.6.1. Congestionamento e repressão

O congestionamento é um problema que está fora do âmbito da dissertação, mas é importante fazer-lhe referência, pois permitirá 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. Uma situação de congestionamento corresponde a uma sobrecarga das

linhas. As situações de congestionamento condicionam a produção e o consumo, sendo o responsável pelo alívio destes congestionamentos o operador de rede.

O CFPF pode ser utilizado para detecção de congestionamentos na rede de transporte. Considere-se um trânsito de potência entre os barramentos j e k dado pela distribuição de possibilidade da Figura 2.14 correspondente a um número difuso trapezoidal.

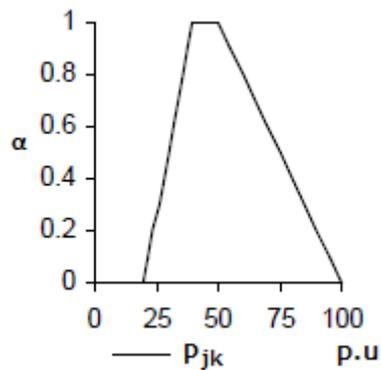


Figura 2.14 - Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada entre os barramentos j e k , sem existência de congestionamento (P_{jk})

Se no ramo entre os barramentos j e k houver uma limitação de 75 p.u., a nova distribuição de possibilidade correspondente a um congestionamento é dada pela Figura 2.15.

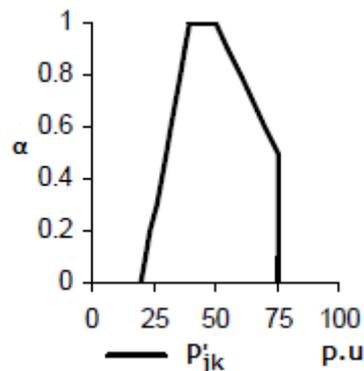


Figura 2.15 - Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada entre os barramentos i e k , com existência de congestionamento (P'_{jk})

A Figura 2.15 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 trânsito de potência chegaria até 100 p.u (corte $\alpha=0.0$).

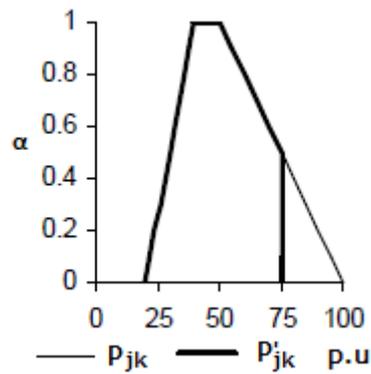


Figura 2.16 - Distribuição de possibilidade para a potência activa injectada entre os barramentos j e k com existência de congestionamento - adaptado de [Gouveia, 2009]

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.

Quando existe um pedido de transporte, caso haja um congestionamento, as produções ou as cargas vão ser limitadas por este, o que tem 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.

Na Figura 2.17 é ilustrada uma *repressão de carga* [Gouveia, 2009], 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.

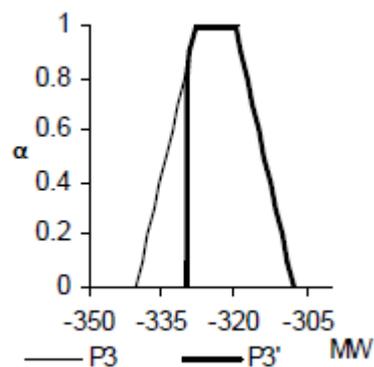


Figura 2.17 - Distribuição de possibilidade para a potência activa de carga no barramento genérico

Pode-se observar na Figura 2.17, que no barramento genérico 3 nunca poderão ser satisfeitos pedidos de procura superiores a 335 MW ($\alpha=0$).

Na Figura 2.18 é ilustrada uma *repressão de produção* [Gouveia, 2009], no barramento genérico 7. Neste caso, P7 representa a potência de produção especificada e P7' a potência de produção admitida pela rede (consequência de congestionamento).

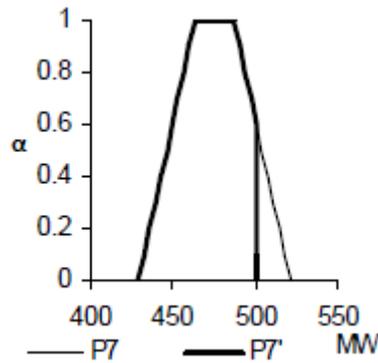


Figura 2.18 - Distribuição de possibilidade para a potência activa de produção no barramento genérico 7

Para satisfação dos pedidos de procura da rede, o barramento genérico 7 deverá produzir sempre acima de 430 MW e nunca mais de 500 MW. Sempre que ocorre repressão e essa situação não é devida a congestionamentos, está-se perante uma *repressão básica* [Gouveia, 2009]. Neste caso não é possível satisfazer as especificações das potências. As repressões básicas podem ser de produção ou de carga. Esta situação surge essencialmente nos casos em que a configuração da rede não admite completamente as especificações de potência pedidas. A metodologia que se propõe na seguinte secção permite a detecção desta situação.

2.3.6.2. Trânsito de potência DC difuso simétrico (DC SFPF)

Matos e Gouveia [2005, 2008] desenvolveram a formulação, do trânsito de potência difuso simétrico (SFPF), com o intuito de eliminar a assimetria existente nos métodos tradicionais. A situação de assimetria existente nas formulações tradicionais tem como consequência resultados que poderão por vezes ser irrealistas, como por exemplo trânsitos de potência globalmente inviáveis, ou distribuições de possibilidade para geradores com valores acima dos seus limites. No SFPF, todos os barramentos são tratados de igual forma, no sentido de terem definida a sua própria distribuição de possibilidade de produção e/ou carga.

O SFPF deriva directamente do princípio de 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 . Neste modelo é considerado que para todos os barramentos há especificações das potências injectadas sob forma de distribuições de possibilidade.

Para o modelo DC de trânsitos de potência o valor da potência activa máxima no ramo k é dado por:

$$\text{Max} \quad \tilde{P}_k(\alpha) = \tilde{P}_k^{\text{Max}}(\alpha) = \sum_{j \neq \text{REF}} A_{kj} P_j \quad (2.40)$$

sujeito a:

$$P_j^{\text{Min}}(\alpha) \leq P_j \leq P_j^{\text{Max}}(\alpha) \quad j = 1, \dots, nb \quad (2.41)$$

$$\sum_j^{nb} P_j = 0 \quad (2.42)$$

onde $P_j^{\text{Min}}(\alpha)$ e $P_j^{\text{Max}}(\alpha)$ correspondem ao intervalo de nível α para a potência activa injectada \tilde{P}_j , A_{kj} representa o elemento 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 $\tilde{P}_k^{\text{Min}}(\alpha)$ bastará resolver (2.40) 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. A restrição (2.42) é a equação de balanço entre a produção e consumo. A restrição (2.41) corresponde ao limite mínimo e máximo da potência injectada, em cada barramento j , para um determinado corte de nível α .

O cálculo (max/min) para cada um dos cortes de nível α no intervalo $[0, 1]$ permite a construção da distribuição de possibilidade completa para cada trânsito de potência a calcular. No entanto, possui a vantagem de ser completamente simétrico relativamente aos barramentos. Nesse sentido os resultados não se alteram, quando se varia o barramento de referência.

O SFPF além de calcular os trânsitos de potência nos ramos pode ser utilizado para verificar se as potências injectadas desejadas (especificadas) de produção ou carga são ou não possíveis.

$$\text{Max}(\text{min}) \quad \tilde{P}_z^{\text{final}}(\alpha) \quad (2.43)$$

sujeito a:

$$P_j^{\text{Min}}(\alpha) \leq P_j \leq P_j^{\text{Max}}(\alpha) \quad j = 1, \dots, nb \quad (2.44)$$

$$\sum_j^{nb} P_j = 0 \quad (2.45)$$

A aplicação do SFPF permite determinar quais os trânsitos de potência (2.40-2.42) e potências injectadas (2.43-2.45) 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. A não satisfação total das potências especificadas é denominada por repressão básica.

O modelo pode também ser utilizado para calcular os argumentos das tensões bastando para esse efeito substituir na função objectivo (2.43), a potência injectada pelo argumento:

$$\text{Max}(\text{min}) \quad \tilde{\theta}_z(\alpha) \quad (2.46)$$

sujeito a:

$$P_j^{\text{Min}}(\alpha) \leq P_j \leq P_j^{\text{Max}}(\alpha) \quad j = 1, \dots, nb \quad (2.47)$$

$$\sum_j^{nb} P_j = 0 \quad (2.48)$$

2.3.6.3. Exemplo Ilustrativo comparando o FPF com o SFPF

Neste exemplo são comparados dois modelos de FPF: a primeira formulação do FPF [Miranda e Matos, 1989] e o SFPF [Matos e Gouveia, 2005; 2008].

Para este efeito utiliza-se a rede de 3 barramentos da Figura 2.19, sendo a produção e a carga dada por números difusos triangulares e com reactância dos ramos igual a j 1.0 pu. Foi escolhido o barramento 1 para referência.

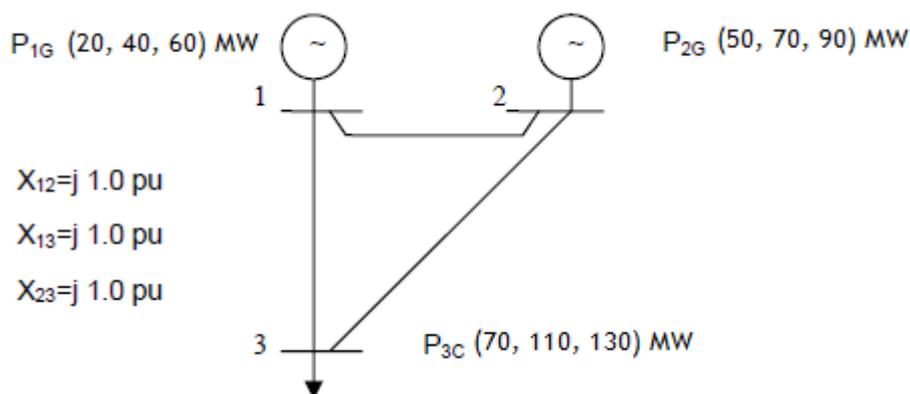


Figura 2.19 - Rede de teste de 3 barramentos, 3 ramos (versão 2)

Os resultados dos trânsitos de potência difusos, calculados a partir do FPF e do SFPF estão ilustrados nas Figuras 2.20 e 2.21.

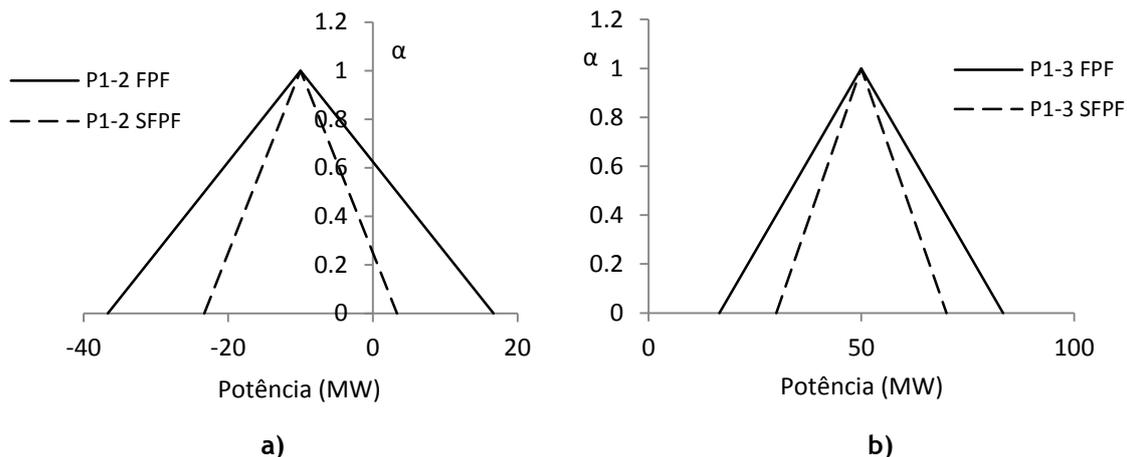


Figura 2.20 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 1-3 (b)

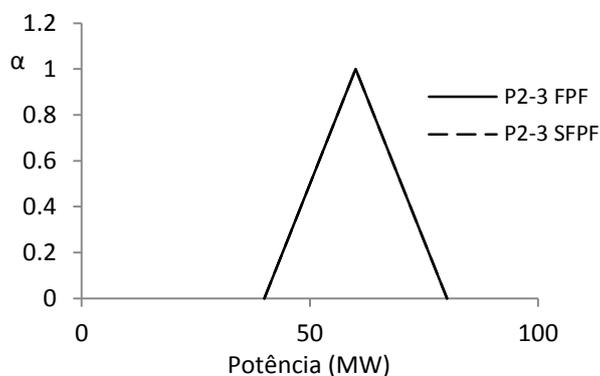


Figura 2.21 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa no ramo 2-3

Pode-se observar na Figura 2.20b, que para um corte de nível $\alpha=0$, o trânsito de potência máximo no ramo 1-3 é 70 MW, para o SFPF. Ao contrário do SFPF, o FPF admite um trânsito de potência máximo de 83 MW, para o mesmo nível de corte. Os trânsitos de potência maiores que 70 MW são trânsitos de potência determinísticos inviáveis.

No caso SFPF apenas são permitidos trânsitos de potência determinísticos viáveis. O FPF admite todas as combinações possíveis de potências, o que faz aumentar artificialmente a incerteza. Este aumento faz com que por vezes os valores máximos sejam superiores aos trânsitos de potência determinísticos viáveis. Isto é o que acontece na Figura 2.20.

Um aspecto que tem sido referido é o facto de o SFPF oferecer sempre os mesmos resultados independentemente da escolha do barramento de referência. Este aspecto tem a 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 no barramento de referência, como sucede com a formulação clássica do FPF.

O exemplo seguinte continua a considerar as distribuições triangulares e a rede da Figura 2.19, com a diferença de se escolher o barramento 2 como de referência.

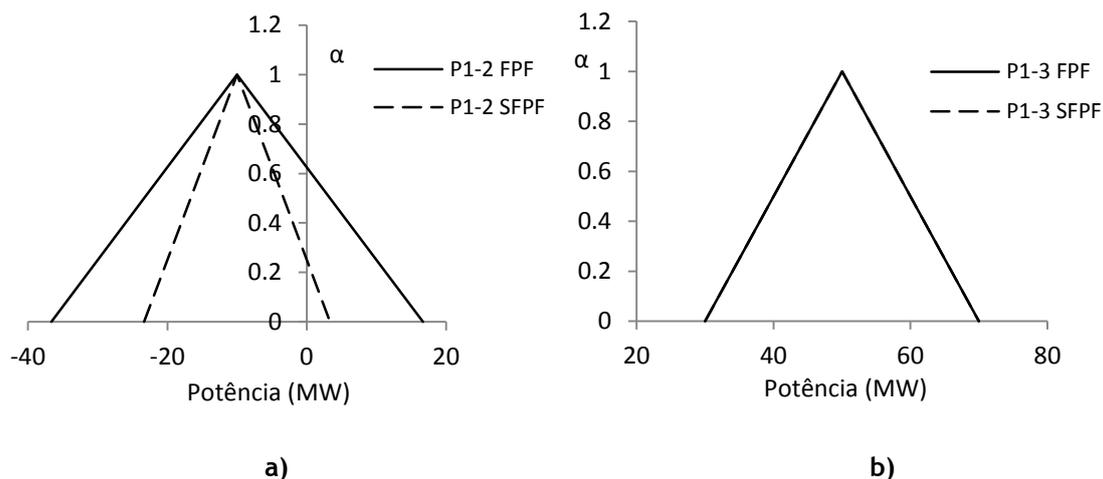


Figura 2.22 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 1-3 (b)

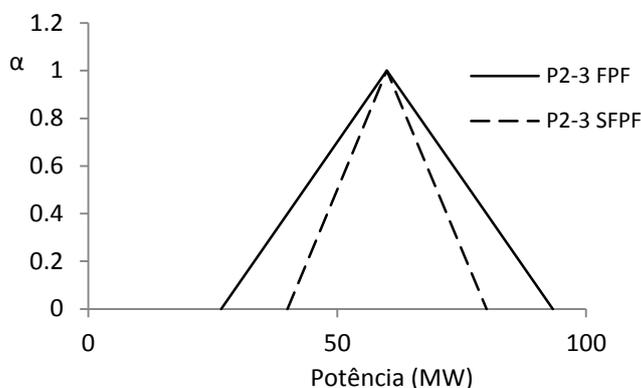


Figura 2.23 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa no ramo 2-3

Como se pode verificar nas Figuras 2.22a e 2.23, a formulação FPF apresenta 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.

Com o aumento do número de barramentos, os problemas identificados terão tendência para se agravar.

2.3.6.4. Trânsito de potência DC difuso constrangido (DC CFPF)

Embora o CFPF esteja fora do âmbito da dissertação é importante fazer-lhe referência, pois permite detectar congestionamentos na rede de transporte.

O CFPF representa o estudo do problema de trânsito de potências difuso simétrico com imposições à capacidade de transporte (limites dos ramos). O modelo DC anterior (2.40-2.43) para o SFPP é transformado no CFPF (2.49- 2.52):

$$Max \quad \tilde{P}_k(\alpha) = \tilde{P}_k^{Max}(\alpha) = \sum_{j \neq REF} A_{kj} P_j \quad (2.49)$$

sujeito a:

$$P_j^{Min}(\alpha) \leq P_j \leq P_j^{Max}(\alpha) \quad j = 1, \dots, nb \quad (2.50)$$

$$\sum_j^{nb} P_j = 0 \quad (2.51)$$

$$|A \cdot P| \leq P_{LIM} \quad (2.52)$$

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

De referir que, como resultados, apenas serão disponibilizados fluxos de carga viáveis, onde possam ocorrer congestionamentos nos ramos serão detectados de imediato. 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 detectar 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:

$$Max(\min) \quad \tilde{P}_z^{final}(\alpha) \quad (2.53)$$

sujeito a:

$$P_j^{Min}(\alpha) \leq P_j \leq P_j^{Max}(\alpha) \quad j = 1, \dots, nb \quad (2.54)$$

$$\sum_j^{nb} P_j = 0 \quad (2.55)$$

$$|A \cdot P| \leq P_{LIM} \quad (2.56)$$

Os valores de \tilde{P}_z^{final} definem para cada barramento estudado a verdadeira potência injectada permitida pela rede de transporte nas condições actuais. Se $\tilde{P}_z^{final} \neq \tilde{P}_z$ (onde \tilde{P}_z 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. Para se calcular o argumento das tensões basta substituir na função objectivo (2.53), a potência injectada por $\tilde{\theta}_z(\alpha)$.

Capítulo 3

Despacho óptimo difuso

3.1. Introdução

No capítulo anterior foram descritos alguns métodos que permitem resolver o problema de trânsito de potências difuso, em que se considerou que as potências de carga e/ou as potências produzidas eram definidas por números difusos. A resolução deste problema permite obter distribuições de possibilidade para diversas grandezas não condicionadas por considerações de carácter económico. A integração de elementos desta natureza revela-se importante de tal forma que, de entre as diversas estratégias de produção viáveis, seja adoptada a que (ou uma das que) estiver associada ao custo de produção mínimo. A importância das questões económicas levou à definição do despacho óptimo.

O despacho óptimo (ou económico) permite determinar a potência a fornecer por cada gerador em serviço, que conduz ao mínimo custo global de produção do sistema, considerando os 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. O despacho económico foi desenvolvido para centrais térmicas, nas quais são determinantes os custos dos combustíveis.

Para incluir as incertezas ao nível das potências das cargas, foi desenvolvido um modelo de despacho óptimo difuso.

Miranda e Saraiva [1992] desenvolveram um despacho óptimo que passou a integrar a incerteza das cargas, resultando assim o *despacho difuso básico* (na terminologia inglesa, *Basic Fuzzy Dispatch*, BFD). Além desta metodologia também desenvolveram o *trânsito de potência óptimo difuso* (na terminologia inglesa, *Fuzzy Optimal Power Flow*, FOPF).

O FOPF não será abordado na dissertação, pois está fora do âmbito desta. Informação sobre o FOPF pode ser encontrada em [Miranda e Saraiva, 1992; Saraiva e Miranda, 1993; 1994; Saraiva et al, 1994(a)].

Mais tarde, Ferreira [1999] desenvolveu um despacho óptimo difuso denominado por *despacho económico impreciso* (DEI). Outros trabalhos foram entretanto publicados, a título de exemplo podem citar-se [Ahmadi-Khatir et al, 2008; Al-Othman, 2011].

Nas próximas secções serão abordados o BFD e o DEI.

3.2. Custos de produção

Em primeiro lugar, para efeito de despacho é necessário admitir que já está tomada a decisão de quais os grupos que vão estar em serviço (escalonamento). Por isso, para definir os custos de produção no problema de despacho apenas nos interessam os factores variáveis que relacionam o custo de produção com a potência fornecida pelos geradores à rede.

Importa também recordar que existem, embora por razões técnicas diferentes, valores mínimos e máximos de potência que um grupo pode fornecer. Dentro desses limites, a relação entre custo de produção e potência produzida é em geral não linear (quadrática). Simbolicamente esta relação está representada na Figura (3.1).

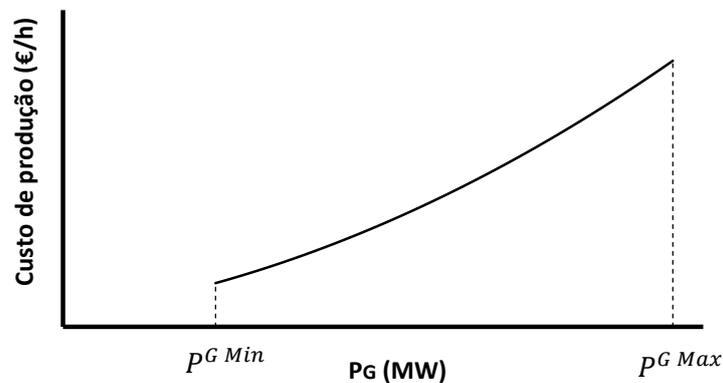


Figura 3.1 - Representação gráfica da curva de custo de produção típica de um gerador termoelétrico

A função custo do gerador i , para uma curva deste tipo é dada pela seguinte equação:

$$C_i(P_i^G) = a_i + b_i \cdot P_i^G + c_i \cdot (P_i^G)^2 \quad (3.1)$$

$$P_i^{G \text{ Min}} \leq P_i^G \leq P_i^{G \text{ Max}} \quad (3.2)$$

Onde:

a_i, b_i, c_i - Constantes da função custo associadas ao gerador i , a_i é expresso em €/h, b_i , em €/h.MW e c_i em €/h.MW²

P_i^G - Potência activa produzida pelo gerador i

$P_i^{G Min}$ - Limite mínimo de produção do gerador i

$P_i^{G Max}$ - Limite máximo de produção do gerador i

3.3. Despacho difuso básico (BFD)

Miranda e Saraiva [1992] apresentam o BFD, cuja função objectivo corresponde à minimização dos custos de produção. As restrições deste problema são os limites das potências produzidas nos geradores, limites da potência de carga e a equação de balanço entre a produção e consumo. Como resultados poderão ser obtidas distribuições de possibilidade para as potências dos geradores.

A resolução deste problema envolve a linearização da função custo quadrática (3.1), transformando em vários segmentos. Esta linearização é feita para a função custo de cada gerador, sendo só considerado um segmento na resolução do problema. Neste caso, o custo de produção de cada gerador é definido pela função linear (3.3).

$$C_i(P_i^G) = a_i + b_i \cdot P_i^G \quad \$/h \quad (3.3)$$

$$P_i^{G Min} \leq P_i^G \leq P_i^{G Max} \quad (3.4)$$

O BFD determina o ponto de funcionamento óptimo do sistema, que corresponde ao ponto de menor custo, para cada nível de corte α . O cálculo (min) para cada um dos cortes de nível α desejados no intervalo [0, 1] permite a construção da distribuição de possibilidade completa para a produção de cada gerador i .

O BFD é calculado a partir das expressões (3.5-3.8) sendo a função objectivo definida para este problema (3.5), que permitirá obter uma solução de custo de produção mínima.

$$\text{Min } \tilde{Z} = \sum_{i=1}^n b_i \tilde{P}_i^G(\alpha) \quad (3.5)$$

Onde:

n - Número de geradores;

$\tilde{P}_i^G(\alpha)$ - Potência difusa produzida pelo gerador i para um nível de corte α .

Quando as cargas e as gerações são representadas por números difusos trapezoidais, as restrições de operação são:

$$\sum_{i=1}^n \tilde{P}_i^G(\alpha) = \tilde{P}^C(\alpha) \quad (3.6)$$

$$\tilde{P}_i^G(\alpha) \Leftrightarrow (P_{i1}^G(\alpha), P_{i2}^G(\alpha), P_{i3}^G(\alpha), P_{i4}^G(\alpha)) \quad (3.7)$$

$$\tilde{P}^C(\alpha) \Leftrightarrow (P_1^C(\alpha), P_2^C(\alpha), P_3^C(\alpha), P_4^C(\alpha)) \quad (3.8)$$

Onde:

$\tilde{P}^C(\alpha)$ - Carga total difusa do sistema para um nível de corte α

A minimização da função objectivo (3.5) é obtida através do *removal* de \tilde{Z} . Considerando a potência do gerador i , um número difuso trapezoidal, o seu removal pode ser calculado da seguinte forma.

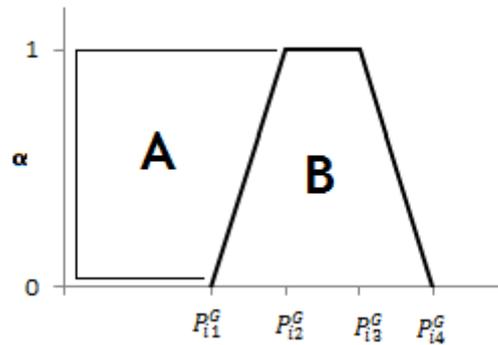


Figura 3.2 - Removal de um número difuso trapezoidal

O removal é calculado em relação a um ponto arbitrário. Neste caso o ponto de referência é o 0, sendo calculado o Removal(0). O removal pode ser calculado em relação a outros pontos de referência.

A área desde a origem até ao número difuso trapezoidal é dada por:

$$A = \frac{P_{i2}^G + P_{i1}^G}{2} \quad (3.9)$$

A área do número difuso trapezoidal é dada por:

$$B = \frac{(P_{i4}^G - P_{i1}^G) + (P_{i3}^G - P_{i2}^G)}{2} \quad (3.10)$$

Sendo o removal do número difuso trapezoidal dado por:

$$Removal = \frac{(2A + B)}{2} = \left(\frac{P_{i1}^G + P_{i2}^G + P_{i3}^G + P_{i4}^G}{4} \right) \quad (3.11)$$

Para números difusos triangulares, o removal é dado por:

$$Removal = \left(\frac{P_{i1}^G + 2P_{i2}^G + P_{i4}^G}{4} \right) \quad (3.12)$$

Considerando as cargas e as potências geradas, números difusos trapezoidais, o BFD é definido por:

$$Min Z = \sum_{i=1}^n b_i \sum_{k=1}^4 P_{ik}^G(\alpha)/4 \quad (3.13)$$

*su*j:

$$\sum_{i=1}^n P_{ik}^G(\alpha) = P_k^C(\alpha) \quad k = 1, \dots, 4 \quad (3.14)$$

$$P_i^{G \text{ Min}} \leq P_{i1}^G(\alpha) \leq P_{i2}^G(\alpha) \leq P_{i3}^G(\alpha) \leq P_{i4}^G(\alpha) \leq P_i^{G \text{ Max}} \quad i = 1, \dots, n \quad (3.15)$$

Onde:

$P_i^{G \text{ Min}}$ - Limite mínimo de produção do gerador i

$P_i^{G \text{ Max}}$ - Limite máximo de produção do gerador i

A função objectivo (3.13) determina o conjunto de valores ($P_{ik}^G(\alpha)$), que tornam mínimo o Removal(0) do custo de produção. A restrição (3.14) é a equação de balanço entre a produção e consumo, A restrição (3.15) garante a consistência do número difuso e limita a produção de cada gerador i .

O número de variáveis e restrições do problema podem ser determinados da seguinte maneira, para números difusos trapezoidais:

- Variáveis: $4 \cdot n$
- Restrições: $4 + 5 \cdot n$

Caso as cargas e as potências geradas sejam números difusos triangulares, o BFD é definido por:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n b_i \left(\frac{P_{i1}^G(\alpha) + 2P_{i2}^G(\alpha) + P_{i3}^G(\alpha)}{4} \right) \quad (3.16)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n P_{ik}^G(\alpha) = P_k^C(\alpha) \quad k = 1, \dots, 3 \quad (3.17)$$

$$P_i^{G \text{ Min}} \leq P_{i1}^G(\alpha) \leq P_{i2}^G(\alpha) \leq P_{i3}^G(\alpha) \leq P_i^{G \text{ Max}} \quad i = 1, \dots, n \quad (3.18)$$

Neste modelo não são consideradas as perdas activas. Mais detalhes sobre este modelo podem ser encontrados em Miranda e Saraiva [1992].

3.3.1. Exemplo ilustrativo do BFD

Nesta secção vai-se usar o BFD para realizar um despacho óptimo difuso. No modelo BFD não se tem em conta a rede de transporte. Dessa forma, está-se perante um modelo de barramento único, ao qual estarão ligados 3 geradores e a carga total do sistema. O custo de produção de cada gerador é definido pela função linear (3.3).

Na Tabela 3.1 estão ilustrados os dados da produção de potência activa e os valores das constantes das funções custo de cada gerador.

Tabela 3.1 - Características dos geradores

Gerador	$P_i^{G \text{ Min}}$	$P_i^{G \text{ Max}}$	a (€/h)	b (€/MWh)
1	20	240	200	14
2	50	200	250	14.5
3	50	120	100	15

A carga total do sistema é modelizada por um número difuso triangular, cujo valor é igual (280, 400, 520).

As distribuições de possibilidade para os geradores 1, 2 e 3 estão ilustradas nas seguintes figuras:

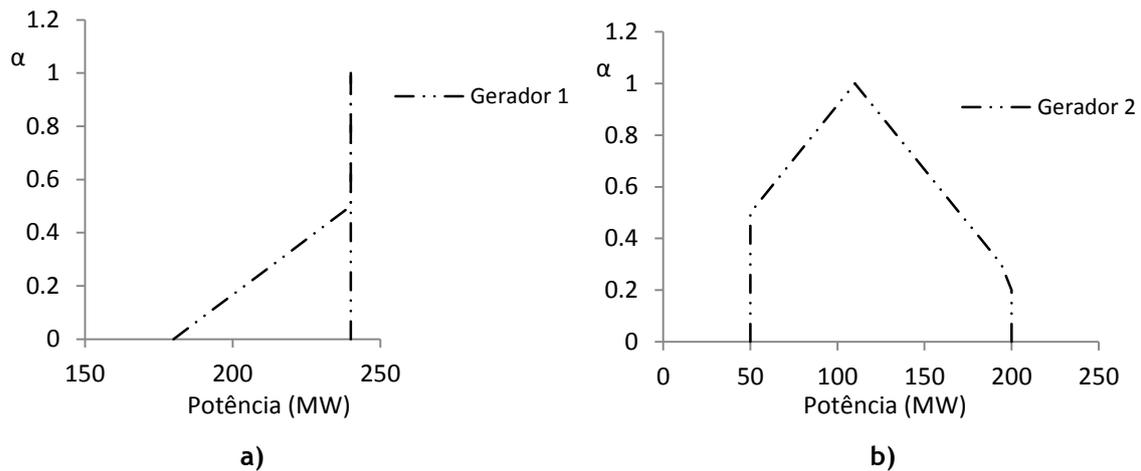


Figura 3.3 - Distribuição de possibilidade para a potência produzida nos geradores 1 (a) e 2 (b)

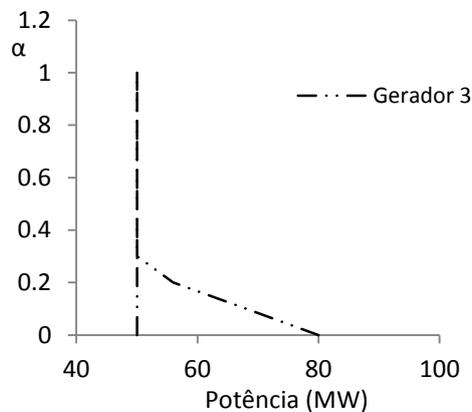


Figura 3.4 - Distribuição de possibilidade para a potência produzida no gerador 3

Observando as figuras pode-se concluir que os geradores são despachos por ordem crescente de custo marginal. Como as funções custo são lineares, o custo marginal é igual ao b_i . O primeiro gerador a ser despacho é o gerador 1 (14 €/MWh), seguindo-se o gerador 2 (14.5 €/MWh) e o gerador 3 (15 €/MWh).

3.4. Despacho económico impreciso (DEI)

Ferreira [1999] desenvolveu o DEI com o intuito de calcular o despacho óptimo para cada aumento de carga, até ser atingido o colapso de tensão. Como as cargas são definidas por números difusos, o despacho será um despacho difuso, sendo o resultado para a produção em cada máquina traduzido por um número difuso.

A formulação DEI consiste em determinar um despacho óptimo difuso, de modo a obter a distribuição de possibilidade para cada gerador, minimizando os custos de produção.

O método DEI considera os limites máximos de produção de cada gerador. Para cada ponto a , b , c e d da carga total (Figura 3.5) determina-se o despacho óptimo. Primeiro calcula-se o despacho para o ponto a , determinando-se assim a produção de cada gerador. Depois calcula-se o despacho para o ponto b . Se algum gerador estiver a funcionar no seu limite máximo no ponto b , determina-se o ponto (a') para o qual o gerador atingiu o seu limite. Depois de se determinar esse ponto subtrai-se à carga total a carga já alimentada, ou seja, a carga que vai de a até a' , determinando-se assim a distribuição de possibilidade da nova carga para os restantes geradores. A distribuição de possibilidade do gerador, que atingiu o limite no ponto a' , corresponde à potência produzida por este entre a e a' .

De seguida é apresentado o algoritmo do despacho óptimo impreciso, onde são ilustradas as suas várias etapas:

1. Calcular a carga total difusa (Figura 3.5) dada pela soma de todas as cargas difusas do sistema representadas por números difusos trapezoidais;

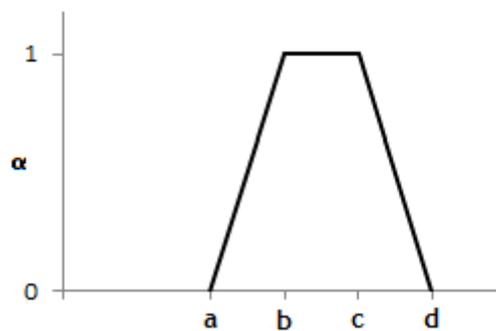


Figura 3.5 - Representação difusa da carga total

2. Resolver um estudo de despacho óptimo para o primeiro ponto da distribuição de possibilidade da carga total (a);
3. Resolver um estudo de despacho óptimo para o valor da carga associado ao ponto b ; Verificar se alguma máquina entrou em funcionamento entre a carga anterior e a nova carga. Se tal se verificar passar a **6**;
Se a carga tiver sido satisfeita passar a **8**;
4. Se a carga não for satisfeita por alguma(s) máquina(s) ter(em) atingido o(s) seu(s) limite(s) de produção, identificar a máquina que primeiro atingiu o limite. Esta identificação é realizada utilizando o algoritmo do despacho óptimo associado a um processo iterativo baseado no método das bissecções sucessivas;

5. Calcular a potência total fornecida quando essa máquina atinge o limite referido. De acordo com a Figura 3.6, calcular o corte de nível α associado ao valor da potência total referida. Calcular a produção de cada máquina. Passar a 7;

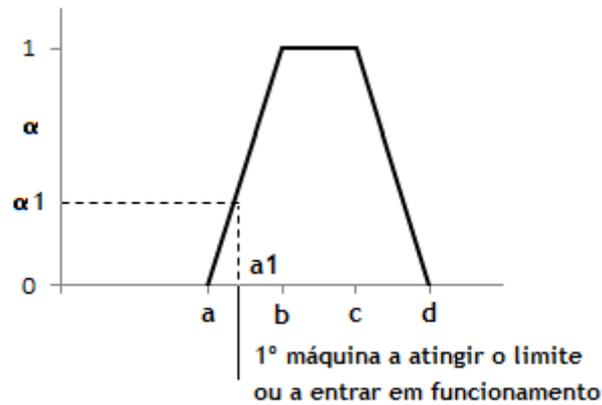


Figura 3.6 - Representação de um corte de nível α - adaptado de [Ferreira, 1999]

6. Calcular a potência total fornecida no ponto em que a máquina entra em funcionamento. Calcular o corte α_1 - Figura 3.6. Calcular a produção de cada máquina.
7. Subtrair à carga total a carga já alimentada. Para a restante carga (ponto a_1 da Figura 3.7), realizar um novo estudo de despacho óptimo e repetir todo o processo a partir de 3.

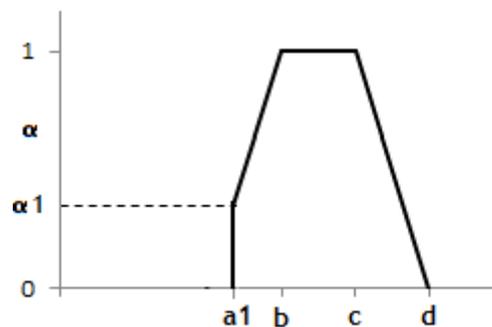


Figura 3.7 - Representação difusa da nova carga total

8. Repetir a partir de 3 até terem sido analisados todos os pontos da carga.

Mais informação sobre o DEI pode ser encontrada em [Ferreira, 1999]. De seguida é apresentado um exemplo ilustrativo do DEI.

3.4.1. Exemplo ilustrativo do DEI

Tal como o BFD, o DEI é um modelo de barramento único, ao qual estarão ligados 3 geradores e a carga total do sistema. O custo de produção de cada gerador é definido pela função quadrática (3.1). Este exemplo ilustrativo do DEI foi adaptado de [Ferreira, 1999].

Na Tabela 3.2 apresentam-se os dados da produção de potência activa e os valores das constantes das funções custo de cada gerador.

Tabela 3.2 - Características dos geradores

Gerador	P^G_{Max}	P^G_{Min}	a (€/h)	b (€/MWh)	c (€/MW ² .h)
1	100	0	50	5.6	0.037
2	40	0	72	4.8	0.037
3	75	0	71	4.95	0.039

A Figura 3.8 ilustra a carga difusa total do sistema.

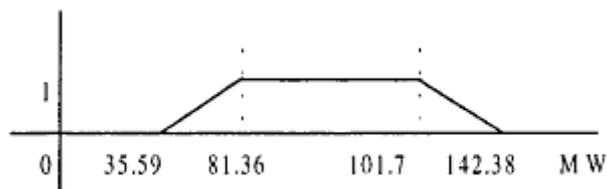


Figura 3.8 - Representação difusa da carga total - adaptado de [Ferreira, 1999]

Com base no algoritmo do despacho económico impreciso obtiveram-se os resultados descritos na Tabela 3.3 e representados graficamente na Figura 3.9.

Tabela 3.3 - Resultados obtidos para os diferentes geradores

Cortes (α)	0	0.505	1	1	0.673	0
P^G_1 (MW)	0	0	0	0	0	27.38
P^G_2 (MW)	28.13	40	40	40	40	40
P^G_3 (MW)	7.46	18.72	41.36	61.7	75	75
Carga Total (MW)	35.59	58.72	81.36	101.7	115	142.38

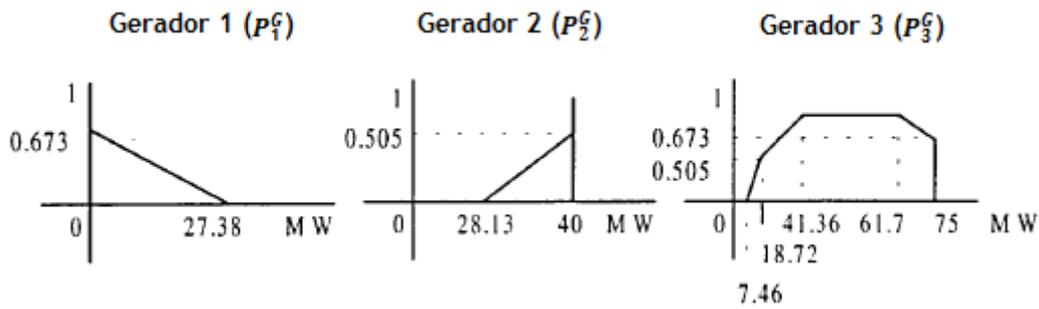


Figura 3.9 - Representação gráfica das produções de potência activa dos geradores 1, 2 e 3 - adaptado de [Ferreira, 1999]

Os geradores 2 e 3 começaram a funcionar desde o início, devido aos seus custos de produção. O gerador 2 atingiu o seu limite máximo de produção de potência activa entre o corte de nível 0 e o corte de nível 1. Calculou-se o ponto exacto em que a máquina atingiu o limite e o corte de nível correspondente (0.505). O gerador 3 atingiu o seu limite de produção entre o corte de nível 1 e o corte de nível 0, precisamente no corte de nível 0.673. A partir deste ponto o gerador 1 inicia a sua produção. O gerador 1 não atinge o limite máximo de produção.

Um próximo passo seria comparar o DEI ao BFD. Esta comparação não faz sentido, uma vez que o BFD usa como função custo, uma função linear. A função custo utilizada no DEI é uma função quadrática.

Uma forma de solucionar este problema, seria linearizar a função custo quadrática, transformando em vários segmentos. As funções custo quadráticas são de natureza convexa e portanto é possível estarmos descansados quanto ao facto de existir uma solução óptima única (ou, se não for única, será representada por um conjunto conexo) para o problema de optimização em análise.

A linearização por segmentos de declive crescente não introduz, portanto, nenhuma complicação formal no processo de minimização. Se admitíssemos que os diversos segmentos estivessem em "competição", diríamos que a potência seria "produzida" primeiro no segmento de menor declive e assim sucessivamente - desta forma, garante-se que só há potência "produzida por um segmento" quando os antecessores já esgotaram a sua capacidade de produção. De facto, esta é uma maneira muito cómoda de olhar para este problema matemático: desdobrar cada gerador, com uma função custo linear por segmentos, num conjunto de geradores, cada um com um custo linear correspondente ao declive de cada segmento.

No próximo capítulo será apresentada uma nova abordagem para o problema do despacho óptimo difuso.

Capítulo 4

Trânsito de potência difuso simétrico com despacho incorporado

4.1. Introdução

Neste capítulo é apresentada uma nova abordagem para o problema de trânsito de potências difuso, que considera as dependências económicas entre produção e carga. As dependências entre produção e carga resultam da optimização do despacho óptimo difuso, com base no pressuposto de que, para cada realização das incertezas das cargas, a produção será optimizada (minimização dos custos de produção). Isto significa que só existe uma única combinação de produções, que satisfazem a carga total e minimizam os custos de produção. No FPF e no SFPF parte-se do pressuposto que a produção e a carga são independentes, ou seja, as produções podem combinar-se de várias maneiras, de modo a satisfazer a carga total. Esta liberdade combinatória faz aumentar amplitude dos trânsitos de potência possíveis.

A nova metodologia adoptada para o problema de trânsito de potências difuso, deriva directamente do princípio da extensão [Zadeh, 1965] e do SFPF [Matos e Gouveia, 2005, 2008]. De modo a introduzir as dependências económicas, esta abordagem integra um despacho óptimo difuso.

A apresentação deste modelo será realizada para o problema linear (DC). Por se tratar de um método de trânsito de potência com despacho incorporado e pelo facto de a incerteza ser modelizada com recurso a números difusos, esta metodologia é designada por *trânsito de potência difuso simétrico com despacho incorporado*.

Na língua inglesa a formulação referida é designada por *Symmetric Fuzzy Power Flow with Dispatch* (SFPFD). Por uma questão de comodidade sempre que nos referirmos à metodologia no texto será utilizada a sigla na nomenclatura inglesa.

4.2. A questão das dependências

Antes de proceder à apresentação do modelo para o trânsito de potências difuso é importante a introdução de alguns assuntos que permitirão maior clareza no entendimento das secções seguintes.

As formulações tradicionais (FPF) e o SFPF não consideram as dependências económicas entre produção e consumo, de modo a incluir estas desenvolveu-se um novo modelo, o SFPFD. As dependências entre produção e carga resultam da optimização do despacho óptimo difuso, com base no pressuposto de que, para cada realização das incertezas das cargas, a produção será optimizada, minimizando os custos de produção. Os trânsitos de potência obtidos a partir do SFPFD resultam de uma combinação de produções, cujo despacho é óptimo. Isto significa que para um valor de carga total, só existe uma única combinação de produções, que minimiza o custo de produção global. Através da Figura 4.1 pode-se constatar a evolução do despacho quando a carga varia entre 60 e 300 MW.

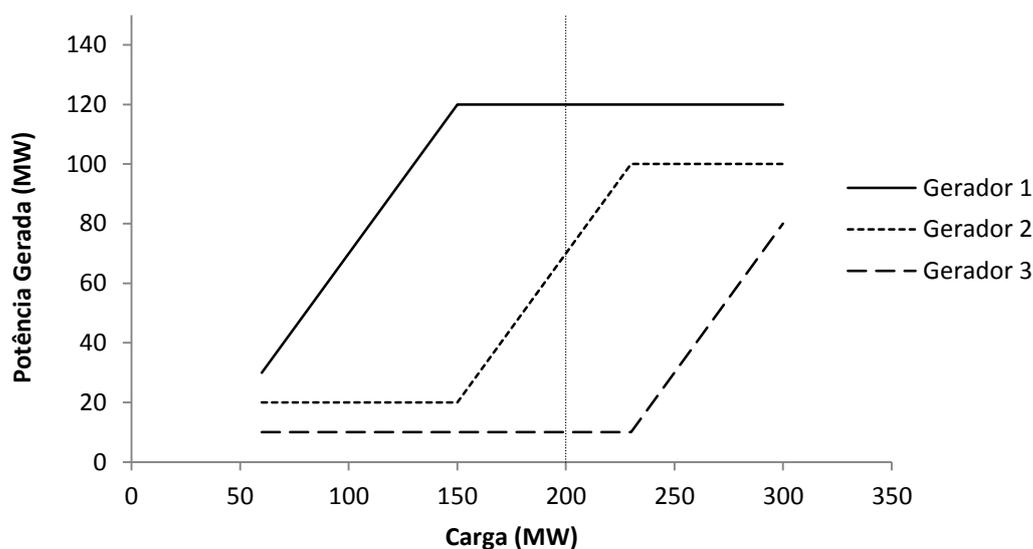


Figura 4.1 - Despacho de um sistema de 3 geradores, para uma carga total [60,300] MW, calculado pelo SFPFD

A Figura 4.1 foi obtida através da aplicação do SFPFD. Esta metodologia será explicada nas secções seguintes. Na Figura 4.1 podemos observar que para uma carga de 200 MW: o gerador 1 produz 120 MW, o gerador 2 produz 70 MW e o gerador 3 produz 10 MW. Cada valor de carga corresponde a uma única situação de despacho (produção), o que demonstra a dependência entre produção e consumo. Os resultados obtidos na Figura 4.1 correspondem a uma distribuição conjunta de possibilidades das produções, que tem em conta as dependências resultantes do despacho económico.

Ao contrário do SPPFD, nos modelos tradicionais (FPF) e no SFPF, as produções dos geradores podem combinar-se de várias maneiras, ou seja, existem varias combinações de produção, que podem satisfazer a carga total. Por vezes a solução do problema corresponde a uma combinação de produções, cujo despacho não é óptimo, ou seja, não minimiza os custos de produção.

Na Figura 4.2 são ilustradas as distribuições de possibilidade de 2 geradores. Na Figura 4.3 é representada a distribuição de possibilidade de uma carga total.

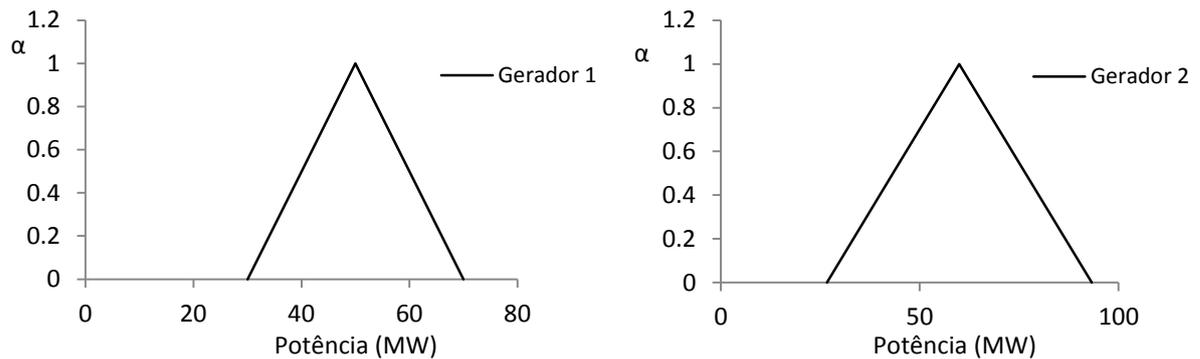


Figura 4.2 - Distribuição de possibilidade dos geradores 1 e 2

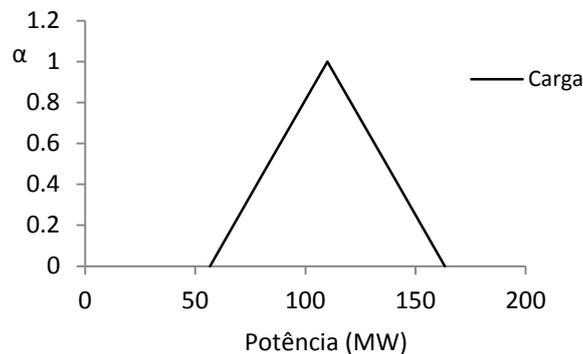


Figura 4.3 - Distribuição de possibilidade da carga total

Nas Figuras 4.2 e 4.3 pode-se observar que a produção do gerador 1 pode combinar de várias maneiras com as do gerador 2, de modo a satisfazer a carga total. Para satisfazer uma carga de 100 MW, para um corte de nível $\alpha=0$, o gerador 1 pode produzir 40 MW e o gerador 2, 60 MW. Mas existe outras combinações possíveis, como por exemplo, o gerador 1 produzir 50 MW e o gerador 2 produzir 50 MW. Só existe uma única combinação, que corresponde à situação de despacho óptimo.

No capítulo 3 foram descritos dois modelos de despacho óptimo difuso, o DEI e o BFD, que permitem determinar as produções de cada gerador para uma carga total difusa do sistema, de modo a minimizar os custos de produção. As produções de cada gerador são

obtidas sob a forma de distribuições de possibilidade. Partindo destes resultados pode-se determinar os trânsitos de potência difusos, através do FPF e do SFPF.

As produções obtidas não devem ser consideradas independentes, pois resultam de um despacho óptimo difuso. Por outro lado, também não são consideradas dependentes, pois continuam a poder combinar-se de várias maneiras, de modo a satisfazer a carga total.

4.3. Trânsito de potência DC difuso simétrico com despacho incorporado (DC SFPFD)

O SFPFD tem como finalidade calcular os trânsitos de potência difusos, considerando as dependências económicas entre produção e carga. Estas dependências resultam da optimização do despacho óptimo difuso, considerando que para cada realização das incertezas das cargas, a produção será optimizada.

Para o modelo DC de trânsitos de potência o valor da potência activa difusa no ramo k é dado por:

$$\text{Max (min)} \quad \tilde{P}_k(\alpha) = \sum_{i \neq REF} A_{k,j} P_j \quad (4.1)$$

*su*_j:

$$P_j^{C \text{ Min}}(\alpha) \leq P_j^C \leq P_j^{C \text{ Max}}(\alpha), \quad j = 1, \dots, nb \quad (4.2)$$

$$\text{Min} \quad \text{Custo} = \sum_{i=1}^n C_i(P_i^G) \quad (4.3)$$

*su*_j:

$$\sum_{i=1}^n P_i^G = \sum_{j=1}^{nb} P_j^C \quad (4.4)$$

$$P_i^{G \text{ Min}} \leq P_i^G \leq P_i^{G \text{ Max}}, \quad i = 1 \dots n \quad (4.5)$$

Onde:

nb - Número de barramentos;

P_i^G - Potência produzida pelo gerador i ;

P_j - Potência injectada no barramento j ;

P_j^G - Potência gerada no barramento j;

P_j^C - Carga no barramento j;

$P_j^{C\ Max}(\alpha)$ - Potência consumida máxima, no barramento j, para um nível de corte α ;

$P_j^{C\ Min}(\alpha)$ - Potência consumida mínima, no barramento j, para um nível de corte α .

Para se obter o valor máximo/mínimo da potência activa $\tilde{P}_k(\alpha)$ bastará resolver o problema de optimização, maximizando/minimizando a função objectivo (4.1). O conjunto dos resultado (máximo e mínimo) obtido 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.

A restrição (4.2) corresponde ao limite mínimo e máximo da carga em cada barramento j, para um dado corte de nível α .

A função objectivo (4.3) determina o conjunto de valores P_i^G , que tornam mínimo o custo de produção. A restrição (4.4) representa a necessidade de a carga ser igual à produção. A restrição de desigualdade (4.5) limita a produção de cada gerador i.

De modo a simplificar o modelo de optimização dividiu-se este em dois. Surgindo assim o *despacho óptimo difuso conjunto* (DODC) e a optimização 2 (OPT2).

O SFPFD passa assim a ser formado por uma “dupla” optimização, ou seja, primeiro realiza-se um despacho óptimo difuso (DODC) e posteriormente partindo dos resultados deste, realiza-se uma segunda optimização, para determinar o trânsito de potência difuso (OPT2). É um método que garante simetria em todos os barramentos, tal como o SFPF e que adicionalmente estabelece uma relação de dependência entre produção e carga.

O DODC permite determinar as funções de produção de cada gerador, para uma carga total difusa. Partindo destas funções, realiza-se a optimização 2, de modo a determinar o trânsito de potência difuso. A partir das funções de produção é possível estabelecer uma relação de dependência entre produção e carga. As funções de produção estabelecem a ligação entre o DODC e a OPT2.

O SFPFD permite calcular as distribuições de possibilidade para as produções dos geradores, para os trânsitos de potência e para as fases. Neste modelo as perdas não são consideradas.

Na secção seguinte será descrito detalhadamente o DODC, enquanto a OPT2 será descrita na secção 4.3.2.

4.3.1. Despacho óptimo difuso conjunto (DODC)

Para se obter o DODC não se terá em conta a rede de transporte. Dessa forma, está-se perante o que se chama um modelo de barramento único, ao qual estarão ligados todos os geradores e do qual se alimentará toda a carga.

O (DODC) permite determinar as funções de produção de cada gerador, para uma carga total difusa. As funções de produção permitem calcular a produção de cada gerador, para uma carga, que se encontre no intervalo da carga difusa. Para se calcular as funções de produção é necessário efectuar os seguintes cálculos:

- Calcular a produção de cada gerador para a carga mínima;
- Calcular a produção de cada gerador para as situações limite. Uma situação é limite, quando o gerador deixa de estar a produzir na potência mínima ou quando atinge a sua potência máxima. O número situações limite é igual a $2n$, onde n é o número de geradores.
- Calcular a produção de cada gerador para a carga máxima;

A partir destes resultados determinam-se as funções de produção. É a partir das funções de produção que é possível estabelecer uma relação de dependência entre produção e carga. O máximo número de optimizações necessárias para a determinação do despacho óptimo difuso é igual a $2.n + 2$. O número de optimizações varia consoante a carga difusa.

O modelo de optimização adoptado para um sistema de n geradores é dado por:

$$\text{Min } \text{Custo} = \sum_{i=1}^n C_i(P_i^G) \quad (4.6)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n P_i^G = P^C \quad (4.7)$$

$$P_i^{G \text{ Min}} \leq P_i^G \leq P_i^{G \text{ Max}}, \quad i = 1 \dots n \quad (4.8)$$

$$P^C \in \left[\sum_{i=1}^n P_i^{G \text{ Min}}, \sum_{i=1}^n P_i^{G \text{ Max}} \right] \quad (4.9)$$

Onde:

P^C - Carga Total.

A função objectivo (4.6) determina o conjunto de valores P_i^G , que tornam mínimo o custo de produção. A restrição (4.7) representa a necessidade de a carga ser igual à produção. A restrição de desigualdade (4.8) limita a produção de cada gerador i .

Se a restrição (4.8) for desprezada, está-se perante um problema de programação não linear com restrições de igualdade. O óptimo do problema pode ser encontrado através da construção do Lagrangeano (4.10).

$$L(P^G, \lambda) = \sum_{i=1}^n C_i(P_i^G) - \lambda \cdot \left(\sum_{i=1}^n P_i^G - P^C \right) \quad (4.10)$$

Como se vê, foi construído o Lagrangeano por adição, à função objectivo original, da restrição multiplicada por um coeficiente λ , designado "coeficiente de Lagrange".

Os pontos estacionários do Lagrangeano podem, em teoria, determinar-se por métodos analíticos clássicos, e correspondem aos seus pontos de gradiente nulo. Há, portanto, que resolver o sistema de equações:

$$\nabla L = 0 \quad (4.11)$$

Neste caso desdobra-se em:

$$\frac{\partial L}{\partial P_i^G} = \frac{\partial C_i(P_i^G)}{\partial P_i^G} - \lambda = 0 \quad i = 1 \dots n \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^n P_i^G - P^C = 0 \quad (4.13)$$

A observação destas equações ensina-nos coisas interessantes:

- A última condição explica-nos que, nos pontos estacionários do Lagrangeano, a restrição do problema original fica satisfeita: obtém-se, portanto, um ponto viável;
- Por outro lado, nos pontos estacionários, o Lagrangeano reduz-se à função objectivo original (porque se anula a parcela multiplicada por λ); demonstra-se que é possível encontrar o óptimo do problema original por inspecção dos pontos estacionários de Lagrangeano.

As primeiras n restrições mostram-nos que

$$\frac{\partial C_i(P_i^G)}{\partial P_i^G} = \dots = \frac{\partial C_n(P_n^G)}{\partial P_n^G} = \lambda \quad (4.14)$$

ou seja, o ponto óptimo corresponde a uma situação em que os custos marginais de todos os geradores são iguais.

λ é um coeficiente de sensibilidade que relaciona variações no valor da função objectivo original com variações na restrição.

Da equação (4.12) podemos deduzir a seguinte equação, para o custo marginal:

$$\lambda = 2 \cdot P_i^G \cdot c_i + b_i \quad (4.15)$$

Da equação (4.15) resulta para as potências geradas, a seguinte equação:

$$P_i^G = \frac{\lambda - b_i}{2 \cdot c_i} \quad (4.16)$$

Da equação (4.13) resulta para a carga:

$$P^C = \sum_{i=1}^n P_i^G \quad (4.17)$$

Estamos em condições de propor um algoritmo para o despacho óptimo difuso conjunto (DODC). O algoritmo tem basicamente os seguintes pontos:

1. Calcular a potência produzida por cada gerador i , para a carga mínima, através de um método iterativo de lambda. Deste despacho obtém-se a produção de cada gerador e o custo marginal (λ). Informação sobre o método iterativo de lambda pode ser lida no Anexo A.
2. Calcular o lambda máximo (λ_i^{Max}) e mínimo (λ_i^{Min}) para cada gerador i , através das seguintes equações:

$$\lambda_i^{Max} = 2 \cdot P_i^{G Max} \cdot c_i + b_i \quad (4.18)$$

$$\lambda_i^{Min} = 2 \cdot P_i^{G Min} \cdot c_i + b_i \quad (4.19)$$

O lambda mínimo é o custo marginal, para o qual o gerador i deixa de estar a produzir a potência mínima. O lambda máximo é o custo marginal, para o qual o gerador i atinge a potência máxima.

3. Ordenar o lambda máximo e mínimo de cada gerador i , por ordem crescente, num vector λ_o .
4. Calcular a potência produzida por cada gerador i , através da equação 4.16. Este cálculo é efectuado para todos os lambdas. O número de lambdas é igual ao número de lambdas máximos mais o número de lambdas mínimos ($2.n$). Para cada valor de lambda calcular a carga, através de 4.17.

O algoritmo usado é o seguinte:

```

Assumir
 $k=1$ 
Enquanto  $k \leq 2n$  faça
     $i = 1$ 
    Enquanto  $i \leq n$  faça
        
$$P_i^G = \frac{\lambda_o(k) - b_i}{2.c_i}$$

        Se  $P_i^G > P_i^{G Max}$  então
            
$$P_i^G = P_i^{G Max}$$

        Fim de Se
        Se  $P_i^G < P_i^{G Min}$  então
            
$$P_i^G = P_i^{G Min}$$

        Fim de Se
         $i = i+1$ 
    Fim de Enquanto
    
$$P^C = \sum_{i=1}^n P_i^G$$

     $k = k + 1$ 
Fim do Enquanto

```

Este algoritmo calcula as produções de cada gerador e a carga associada a estes, para cada situação limite. Uma situação é limite, quando o gerador deixa de estar a produzir na potência mínima ou atinge a sua potência máxima.

5. Calcular a potência produzida por cada gerador i , para a carga máxima, através de um método iterativo de lambda. Deste despacho obtém-se a produção de cada gerador e o custo marginal (λ).

6. Eliminar as situações de despacho cujas cargas estejam abaixo da carga mínima e acima da carga máxima.

Depois deste ponto é possível representar graficamente a produção de cada gerador em função da carga. Os resultados genéricos obtidos para um sistema de 2 geradores, podem ser representados pela Figura 4.4. A carga difusa é igual a $[P^c(1), P^c(3)]$.

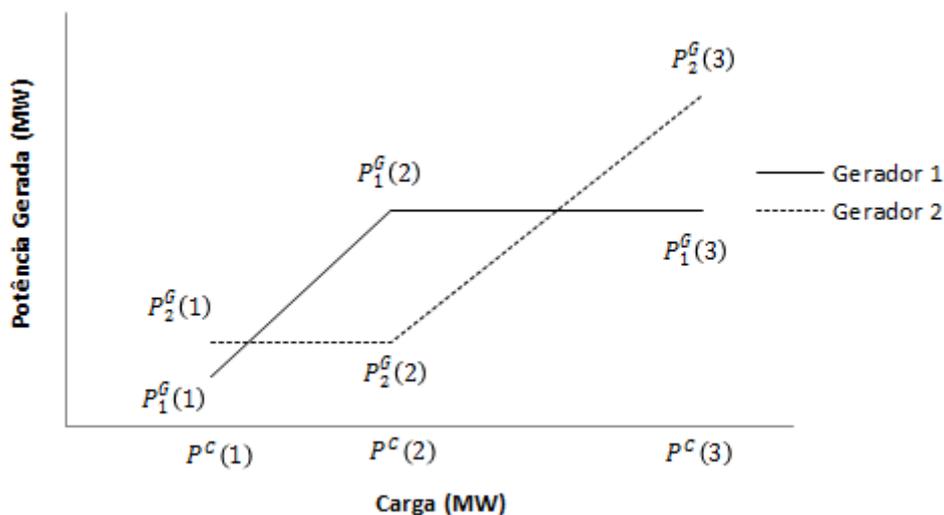


Figura 4.4 - Representação gráfica dos resultados do DODC

Onde:

$P_i^g(k)$ - Potência produzida pelo gerador i para um ponto k

$P^c(k)$ - Carga para um ponto k

No início, o gerador 2 produz no mínimo, porque $\lambda \leq \lambda_2^{Min}$. O gerador 1 produz crescentemente. À medida que a carga aumenta, o λ também aumenta. Quando $\lambda = \lambda_1^{Max}$, o gerador 1 atinge o seu limite máximo e passa a produzir no limite máximo, enquanto o gerador 2 passa a produzir crescentemente. Os geradores continuam a produzir desta forma até se atingirem a carga máxima.

Os resultados obtidos na Figura 4.4 correspondem a uma distribuição conjunta de possibilidades das produções, que tem em conta as dependências resultantes do despacho económico.

7. Determinar as funções de produção para cada gerador i .

Resultados do ponto 7:

Partindo do exemplo da Figura 4.4 determinaram-se as funções de produção.

As funções de produção obtidas para o gerador 1 e 2 são dadas por 4.20 e 4.21 respectivamente.

$$P_1^G(P^C) = \begin{cases} \frac{P_1^G(2) - P_1^G(1)}{P^C(2) - P^C(1)} \cdot P^C + \left(P_1^G(1) - \frac{P_1^G(2) - P_1^G(1)}{P^C(2) - P^C(1)} \cdot P^C(1) \right) & \text{se } P^C(1) \leq P^C < P^C(2) \\ P_1^G(2) & \text{se } P^C(2) \leq P^C \leq P^C(3) \end{cases} \quad (4.20)$$

$$P_2^G(P^C) = \begin{cases} P_2^G(1) & \text{se } P^C(1) \leq P^C < P^C(2) \\ \frac{P_2^G(3) - P_2^G(2)}{P^C(3) - P^C(2)} \cdot P^C + \left(P_2^G(2) - \frac{P_2^G(3) - P_2^G(2)}{P^C(3) - P^C(2)} \cdot P^C(2) \right) & \text{se } P^C(2) \leq P^C \leq P^C(3) \end{cases} \quad (4.21)$$

Nas funções de produção está implícita uma distribuição conjunta de possibilidades das produções, que tem em conta as dependências resultantes do despacho económico.

Apesar de não ser o objectivo do DODC, este permite determinar as distribuições de possibilidade das produções, através das funções de produção. Estas produções não são dependentes da carga, pois podem combinar-se de várias maneiras, de modo a satisfazer a carga total. Por outro lado também não podem ser consideradas independentes, pois resultam de um despacho económico.

Os métodos apresentados no capítulo 3 também permitem determinar as distribuições de possibilidade das produções, mas não permitem calcular as funções de produção.

A finalidade desta abordagem é estabelecer uma relação de dependência entre produção e carga, por isso, estas distribuições não são adequadas para a resolução deste problema. Em detrimento destas são usadas as funções de produção.

4.3.2. Optimização 2 (OPT2)

A optimização 2 deriva do DC SFPF, desenvolvido por Matos e Gouveia [2005, 2008], ou seja, corresponde a resolver problemas de optimização para determinar o valor máximo e mínimo da variável difusa para cada corte de nível α . Neste modelo são usadas as funções de produção, determinadas no modelo DODC.

A ligação deste modelo ao DODC é o que permite estabelecer uma relação de dependência entre produção e carga, sendo este elo de ligação estabelecido pelas funções de produção.

O cálculo (max/min) para cada um dos cortes de nível α permite determinar a distribuição de possibilidade completa para cada trânsito de potência.

Para o modelo DC de trânsitos de potência o valor da potência activa máxima no ramo k é dado por:

$$Max \quad \tilde{P}_k(\alpha) = \tilde{P}_k^{Max}(\alpha) = \sum_{i \neq REF} A_{k,j} P_j \quad (4.22)$$

sujeito a:

$$P_j = P_j^G \left(\sum_{j=1}^{nb} P_j^C \right) - P_j^C \quad (4.23)$$

$$P_j^{C Min}(\alpha) \leq P_j^C \leq P_j^{C Max}(\alpha), \quad j = 1, \dots, nb \quad (4.24)$$

$$\sum_{j=1}^{nb} P_j = 0 \quad (4.25)$$

A função objectivo (4.22) determina o conjunto de valores (P_j^C), que tornam máximo o trânsito de potência activa no ramo k ($\tilde{P}_k^{Max}(\alpha)$).

A restrição (4.23) especifica a potência injectada no barramento j (P_j), onde $P_j^G(\sum_{j=1}^{nb} P_j^C)$ é a função produção do gerador i , existente no barramento j . As equações 4.20 e 4.21 são deste tipo. Note-se que por causa de 4.23, o problema deixa de ser de programação linear.

A restrição (4.24) corresponde ao limite mínimo e máximo da carga em cada barramento j , para um dado corte de nível α . A restrição (4.25) é a equação de balanço entre a produção e consumo.

Para se obter o valor mínimo da potência activa $\tilde{P}_k^{Min}(\alpha)$ bastará minimizar a função objectivo (4.21). 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.

Tal como o SFPF, a escolha do barramento de referência das fases não influencia os resultados.

O modelo pode também ser utilizado para calcular os argumentos da tensão. O argumento da tensão no barramento z é dado por:

$$Max (min) \quad \tilde{\theta}_z(\alpha) \quad (4.26)$$

sujeito a:

$$P_j = P_j^G \left(\sum_{j=1}^{nb} P_j^C \right) - P_j^C \quad (4.27)$$

$$P_j^{C Min}(\alpha) \leq P_j^C \leq P_j^{C Max}(\alpha), \quad j = 1, \dots, nb \quad (4.28)$$

$$\sum_{j=1}^{nb} P_j = 0 \quad (4.29)$$

O modelo de otimização 2 pode ser resolvido por recurso a métodos de programação não linear existindo um vasto conjunto de aplicações comerciais, das quais se destacam Solver do Excel ou Matlab.

Na presente dissertação foi utilizado o Solver do Excel, para resolver este problema de otimização. Optou-se por utilizar este programa, uma vez que possui métodos com elevada capacidade de processamento e de optimização. Os novos Solvers têm capacidade de resolver problemas lineares e não lineares, utilizando métodos como o Simplex e MultiStart, respectivamente. Também possui métodos de programação evolucionários. Para resolver este problema não linear utilizou-se o MultiStart. Em alternativa a este método poder-se-ia ter desenvolvido uma Meta-heurística.

4.3.3. Exemplo ilustrativo do SFPFD

Com a finalidade enunciada, utiliza-se a pequena rede de 3 barramentos da Figura 4.5 sendo a reactância dos ramos igual a j 1.0 pu. Foi escolhido o barramento 1 para referência.

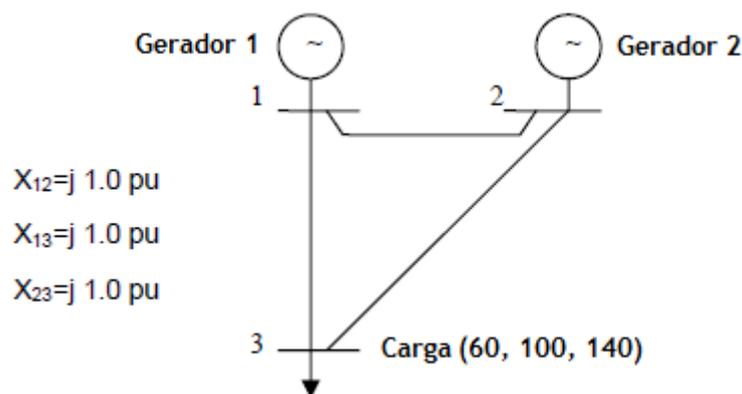


Figura 4.5 - Rede de teste de 3 barramentos, 3 ramos (versão 3)

A Figura 4.6 ilustra a carga difusa no barramento 3, que corresponde à carga total difusa do sistema.

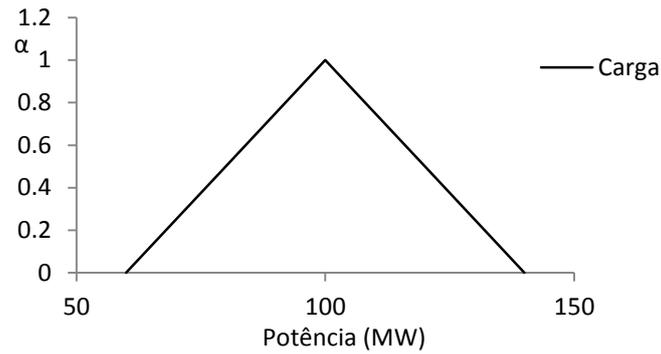


Figura 4.6 - Representação difusa da carga total

O custo de produção de cada gerador é definido pela função quadrática (3.1). Na Tabela 4.1 apresentam-se os dados da produção de potência activa e os valores das constantes das funções custo de cada gerador.

Tabela 4.1 - Características dos geradores

Gerador	P^G_{Min}	P^G_{Max}	a (€/h)	b (€/MWh)	c (€/MW ² .h)
1	30	90	100	14	0.004
2	20	70	200	14	0.0036

Os resultados de despacho obtidos, a partir do SFPFD estão ilustrados na Tabela 4.2 e representados graficamente na Figura 4.7.

Tabela 4.2 - Resultados obtidos para os diferentes geradores

Custo marginal (€/MWh)	14.22	14.24	14.50	14.56
P_1^G (MW)	30	30	63	70
P_2^G (MW)	30	33.3	70	70
Carga (MW)	60	63.3	133	140

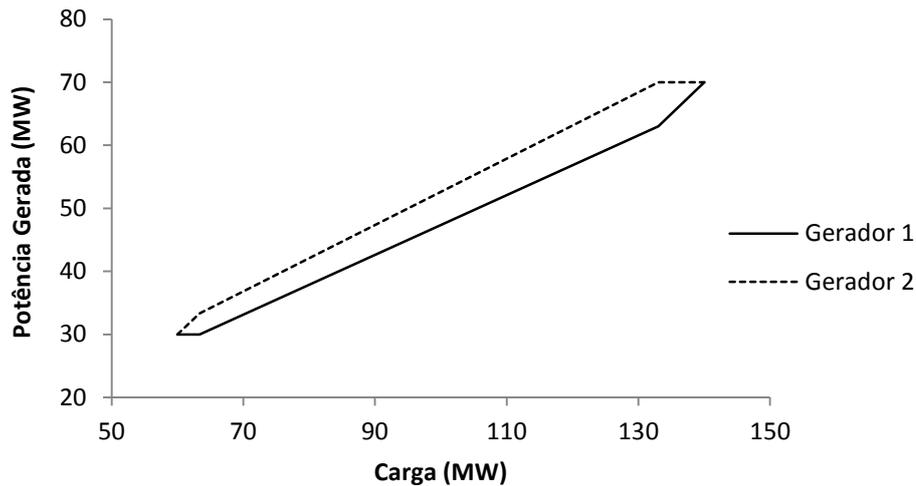


Figura 4.7 - Representação gráfica das produções dos geradores 1 e 2 em função da carga

No início, o gerador 1 produz no mínimo, porque $\lambda < 14.24$ (λ_1^{Min}). O gerador 2 produz crescentemente. À medida que a carga aumenta, o λ também aumenta. Quando $\lambda > 14.24$, o gerador 1 deixa de produzir no mínimo e passa a produzir crescentemente juntamente com o gerador 2, embora com uma quota diferente. Quando $\lambda = 14.5$ (λ_2^{Max}), o gerador 2 atinge o seu limite máximo e passa a produzir no limite máximo, enquanto o gerador 1 continua a produzir crescentemente, embora com uma quota diferente. Os geradores continuam a produzir desta forma até se atingirem a carga máxima. A carga máxima é atingida para $\lambda = 14.56$.

As funções de produção obtidas são as seguintes:

$$P_2^G(P^C) = \begin{cases} 30, & \text{se } 60 \leq P^C < 63.3 \\ 0.474 \cdot P^C, & \text{se } 63.3 \leq P^C < 133 \\ P^C - 70, & \text{se } 133 \leq P^C \leq 140 \end{cases} \quad (4.30)$$

$$P_1^G(P^C) = \begin{cases} P^C - 30, & \text{se } 60 \leq P^C < 63.3 \\ 0.526 \cdot P^C, & \text{se } 63.3 \leq P^C < 133 \\ 70, & \text{se } 133 \leq P^C \leq 140 \end{cases} \quad (4.31)$$

Pode-se observar que as funções de produção 4.30 e 4.31 permitem calcular a potência do gerador 1 e 2, para uma carga, que se encontre no intervalo da carga total difusa.

Apesar de não ser o objectivo do SFPFD é possível obter as distribuições de possibilidade para os geradores 1 e 2, a partir das funções de produção.

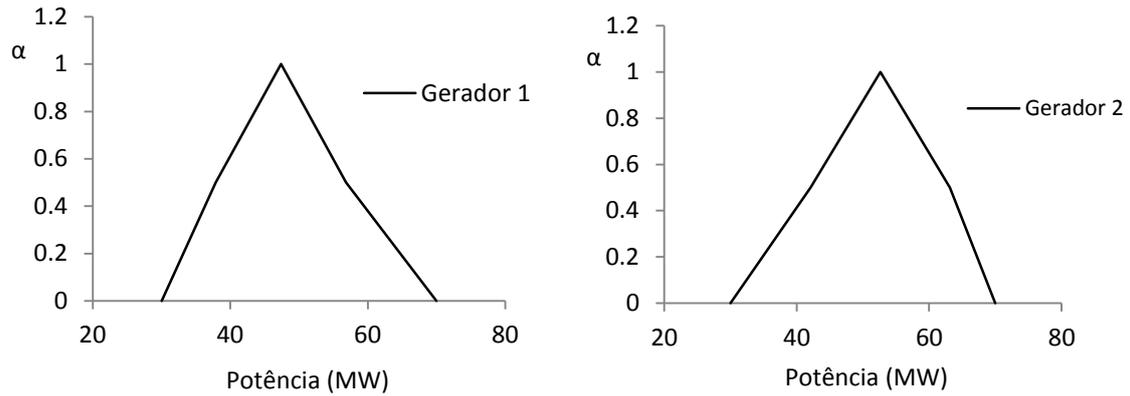


Figura 4.8 - Distribuição de possibilidade para a potência produzida nos geradores 1 e 2

A partir do SFPFD calculou-se também o trânsito de potências difuso, cujos valores estão ilustrados nas Figuras 4.9 e 4.10.

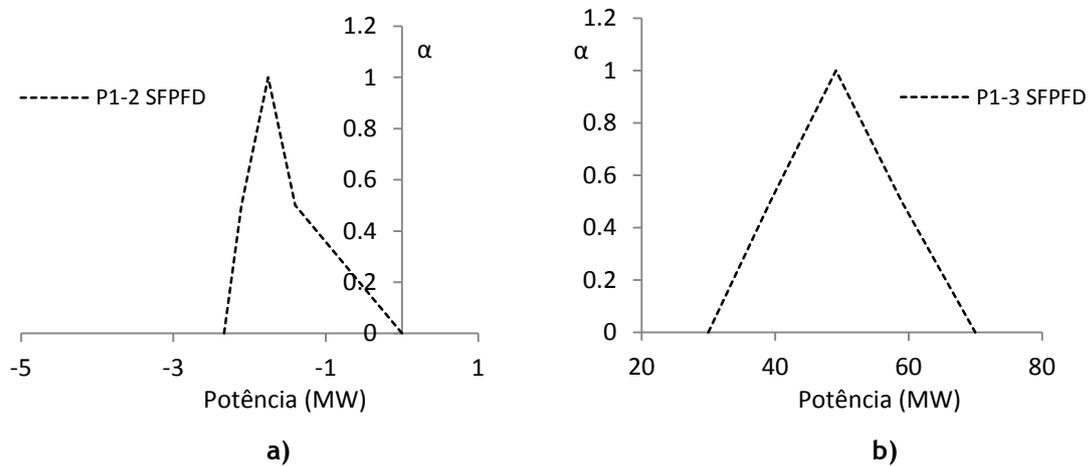


Figura 4.9 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 1-3 (b)

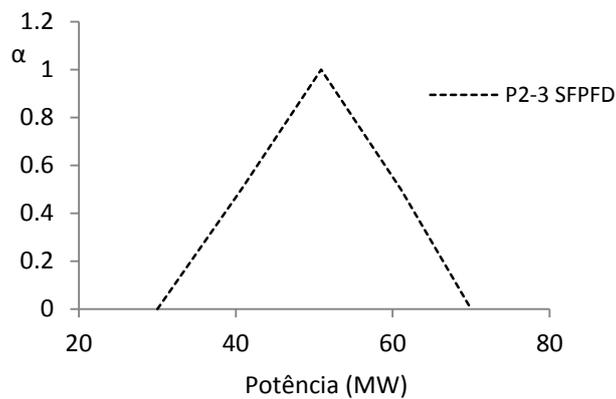


Figura 4.10 - Distribuição de possibilidade para trânsito de potência activa no ramo 2-3

4.3.4. Exemplo ilustrativo comparando o SFPFD com o SFPF e o FPF

Neste exemplo são comparados três modelos de FPF: o FPF [Miranda e Matos, 1989], o SFPF [Matos e Gouveia, 2005; 2008] e o SFPFD. Para este efeito utiliza-se a rede de 3 barramentos da Figura 4.5. Foi escolhido o barramento 1 para referência.

Para calcular o trânsito de potência difuso a partir do FPF e SFPF utilizaram-se as distribuições de possibilidade de produção, obtidas através do SFPFD (Figura 4.8).

Os resultados dos trânsitos de potência difusos, calculados a partir do SFPFD, do FPF e do SFPF são apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12.

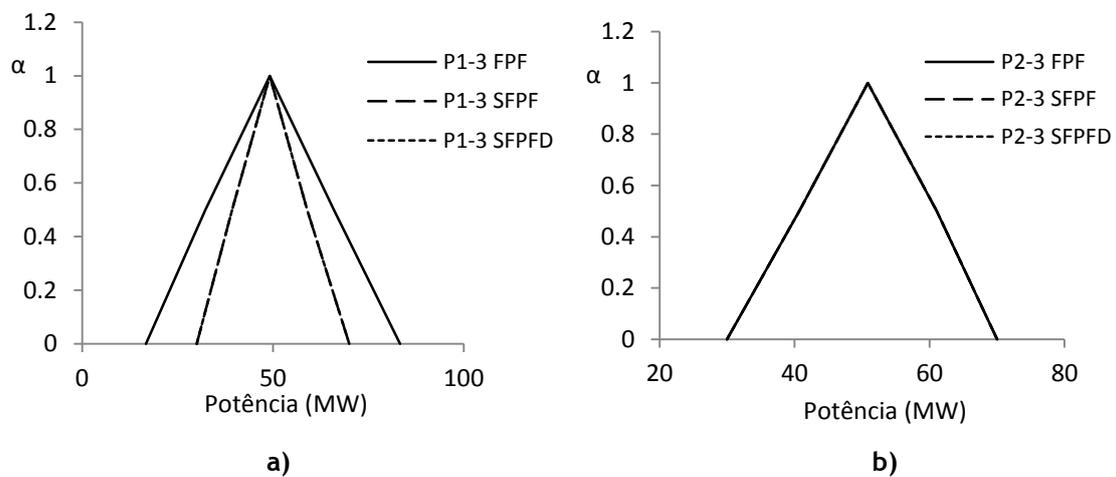


Figura 4.11 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência ativa nos ramos 1-3 (a) e 2-3 (b)

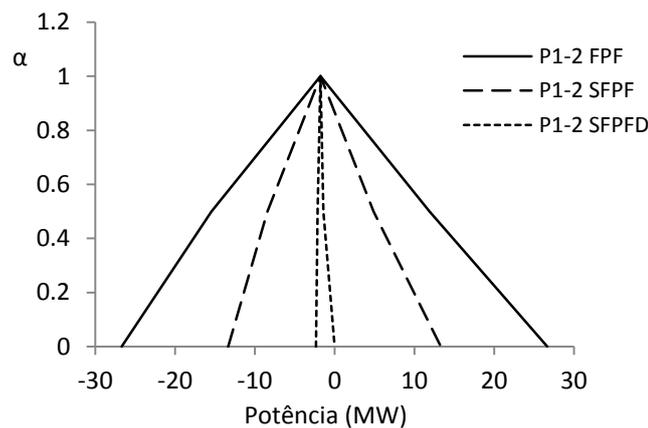


Figura 4.12 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência ativa no ramo 1-2

Na Figura 4.11a, a distribuição de possibilidade P1-3 SFPFD encontra-se em cima da distribuição P1-3 SFPF.

Pode-se observar na Figura 4.12, que para um corte de nível $\alpha=0$, o trânsito de potência máximo no ramo 1-2 é 26 MW, 13 MW e 0, para o FPF, SFPF e SFPFD respectivamente. De acordo com as considerações apresentadas anteriormente os trânsitos de potência maiores que 13 MW, não correspondem a situações que realmente possam acontecer, ou seja, são trânsitos de potência globalmente inviáveis. Para valores superiores a 13 MW não existe nenhum trânsito de potência determinístico viável, cujas potências injectadas correspondam às especificadas.

O FPF admite todas as combinações possíveis de potências, o que faz aumentar artificialmente a incerteza, originando por vezes situações de trânsitos de potência globalmente inviáveis (4.11a e 4.12). No caso do SFPF apenas são permitidos trânsitos de potência determinísticos viáveis. No SFPFD apenas são permitidos trânsitos de potência determinísticos viáveis, cujas produções resultam de um despacho óptimo.

Capítulo 5

Estudo da rede de 14 barramentos do IEEE

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados relativos à aplicação do SFPFD, SFPF e FPF à rede de 14 barramentos do IEEE (Figura 5.1). A esta rede foi acrescentado um novo gerador (G3). Dados relativos a esta rede podem ser encontrados em [www.ee.washington.edu/research/pstca/].

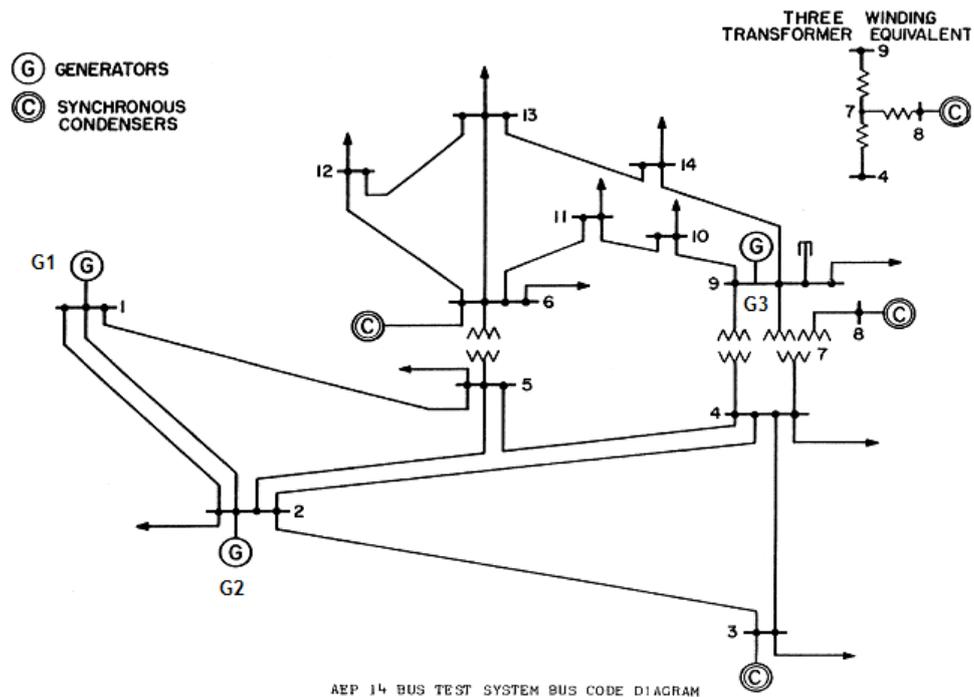


Figura 5.1 - Rede de teste IEEE 14 barramentos modificada, 20 ramos

O diagrama da Figura (5.2) representa a linha de pensamento utilizada para testar a rede com as metodologias SFPFD, SFPF e FPF.

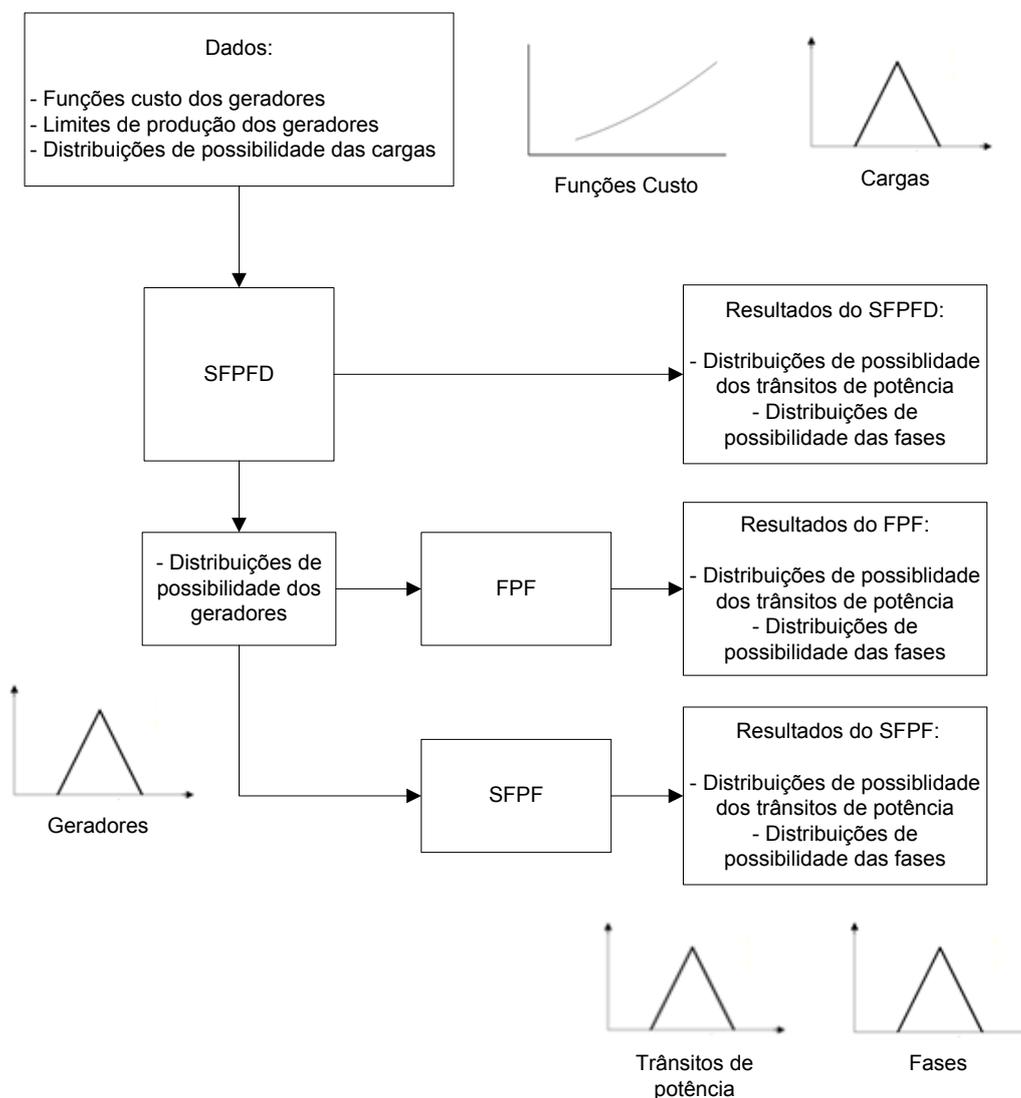


Figura 5.2 - Diagrama de blocos

Na Figura 5.2 pode-se observar que a partir do SFPFD determinam-se as distribuições de possibilidade dos geradores, trânsitos de potência e fases. Através das distribuições de possibilidade dos geradores e do FPF ou do SFPF calculam-se as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência e das fases.

As três metodologias foram programadas e sistematizadas em Visual Basic, a partir do editor do Excel. Utilizou-se o Excel como suporte dos dados e das distribuições de possibilidade. O Solver do Excel foi usado para resolver a otimização 2.

Na secção 5.3 serão apresentados os resultados do SFPFD, enquanto na secção 5.4 será feita uma comparação entre o SFPFD, o SFPF e o FPF.

5.2. Dados da rede

Nesta secção são ilustrados os vários dados da rede de 14 barramento do IEEE modificada. Optou-se por modelizar a incerteza (na carga) com recurso a números difusos triangulares. Os valores das cargas nos vários barramentos estão ilustrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Valores das cargas difusas triangulares

Barramentos	Cargas (MW)		
1	0	0	0
2	35	50	65
3	21	30	39
4	35	50	65
5	28	40	52
6	7	10	13
7	0	0	0
8	0	0	0
9	35	50	65
10	21	30	39
11	28	40	52
12	21	30	39
13	14	20	26
14	35	50	65
Total	280	400	520

A Tabela 5.2 ilustra as reactâncias dos 20 ramos da rede de 14 barramentos do IEEE.

Tabela 5.2 - Dados dos ramos

Ramo	Reactância (pu)	Ramo	Reactância (pu)	Ramo	Reactância (pu)
1-2	0.059	4-9	0.556	9-14	0.270
1-5	0.223	5-6	0.252	10-11	0.192
2-3	0.198	6-11	0.199	12-13	0.200
2-4	0.176	6-12	0.256	13-14	0.348
2-5	0.174	6-13	0.130	4-7	0.209
3-4	0.171	7-8	0.176	9-10	0.085
4-5	0.042	7-9	0.110		

O custo de produção de cada gerador é definido pela função quadrática (3.1). Na Tabela 5.3 apresentam-se os dados da produção de potência activa e os valores das constantes das funções custo de cada gerador.

Tabela 5.3 - Características dos geradores

Gerador	p^G_{Min}	p^G_{Max}	a (€/h)	b (€/MWh)	c (€/MW ² h)
1	20	240	200	14	0.005
2	50	200	250	14.5	0.005
3	50	120	100	15	0.007

Os geradores 1, 2 e 3 encontram-se nos barramentos 1, 2 e 9 respectivamente. Foi escolhido o barramento 1 para referência.

Os resultados obtidos são representados por distribuições de possibilidade por corte de nível α em passos de 0.1, ou seja, para cortes de α iguais a 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.

5.3. Aplicação do SFPFD à rede

Nesta secção será aplicado o SFPFD à rede de 14 barramentos do IEEE modificada, de modo a obter as distribuições de possibilidade dos geradores, dos trânsitos de potência e das fases. Também serão calculadas as funções de produção e o despacho óptimo para a carga total.

Os resultados do DODC estão ilustrados na Tabela 5.4 e representados graficamente na Figura 5.3.

Tabela 5.4 - Resultados obtidos para os diferentes geradores

Custo marginal (€/MWh)	15.4	15.7	16.3
P_1^G (MW)	140	170	236.3
P_2^G (MW)	90	120	186.3
P_3^G (MW)	50	50	97.4
Carga (MW)	280	340	520

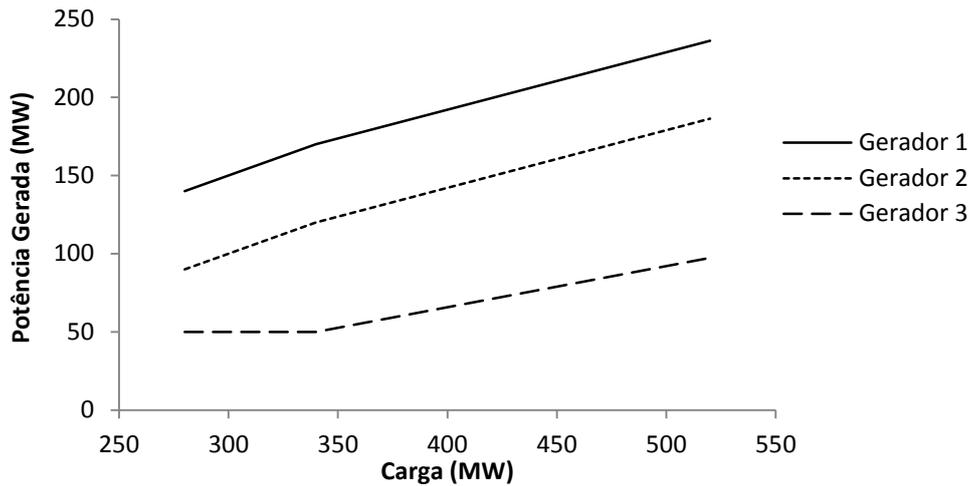


Figura 5.3 - Representação gráfica das produções dos geradores 1, 2 e 3 em função da carga

No início, o gerador 3 produz no mínimo, porque $\lambda < 15.7$ (λ_3^{Min}). Os geradores 1 e 2 produzem crescentemente. À medida que a carga aumenta, o λ também aumenta.

Quando $\lambda > 15.7$, o gerador 3 deixa de produzir no mínimo e passa a produzir crescentemente juntamente com o gerador 1 e 2, embora com quotas diferentes. Os 3 geradores continuam a produzir desta forma até se atingir a carga máxima. A carga máxima é atingida para $\lambda = 16.36$.

As funções de produção obtidas são as seguintes:

$$P_1^G(P^C) \begin{cases} 0.5 \cdot P^C, & \text{se } 280 \leq P^C < 340 \\ 0.368 \cdot P^C + 44.7, & \text{se } 340 \leq P^C \leq 520 \end{cases} \quad (5.1)$$

$$P_2^G(P^C) \begin{cases} 0.5 \cdot P^C - 50, & \text{se } 280 \leq P^C < 340 \\ 0.368 \cdot P^C - 5.3, & \text{se } 340 \leq P^C \leq 520 \end{cases} \quad (5.2)$$

$$P_3^G(P^C) \begin{cases} 50, & \text{se } 280 \leq P^C < 340 \\ 0.263 \cdot P^C - 39.5, & \text{se } 340 \leq P^C \leq 520 \end{cases} \quad (5.3)$$

Note-se, mais uma vez, que nestas funções está implícita uma distribuição conjunta de possibilidades das produções, que toma em conta as dependências resultantes do despacho económico.

Por exemplo, para um corte de nível $\alpha=0$ e uma $P^{C Min} = 280$ MW, resulta:

$$P_1^G(280) = 0.5 \times 280 = 140 \text{ MW}$$

$$P_2^G(280) = 0.5 \times 280 - 50 = 90 \text{ MW}$$

$$P_3^G(280) = 50 \text{ MW}$$

Por outro lado, para um corte de nível $\alpha=0$ e uma $P^{C\ Max} = 520$ MW, resulta:

$$P_1^G(520) = 0.368 \cdot 520 + 44.7 = 236.3 \text{ MW}$$

$$P_2^G(520) = 0.368 \cdot 520 - 5.3 = 186.3 \text{ MW}$$

$$P_3^G(520) = 0.263 \cdot 520 - 39.5 = 97.4 \text{ MW}$$

No entanto, um valor intermédio como $P^C = 400$ MW, não pode resultar da combinação de $P_1^G = 190$ MW, $P_2^G = 120$ MW e $P_3^G = 90$ MW. Para este valor de carga o despacho é o seguinte:

$$P_1^G(400) = 0.368 \cdot 400 + 44.7 = 192.1 \text{ MW}$$

$$P_2^G(400) = 0.368 \cdot 400 - 5.3 = 142.1 \text{ MW}$$

$$P_3^G(400) = 0.263 \cdot 400 - 39.5 = 65.8 \text{ MW}$$

Como podemos observar, cada valor de carga corresponde a uma única situação de despacho (produção), o que demonstra a dependência entre produção e consumo. Esta dependência reflecte-se também nos resultados dos trânsitos de potência.

As distribuições de possibilidade para as potências produzidas nos geradores 1, 2 e 3 estão ilustradas nas Figuras 5.4 e 5.5.

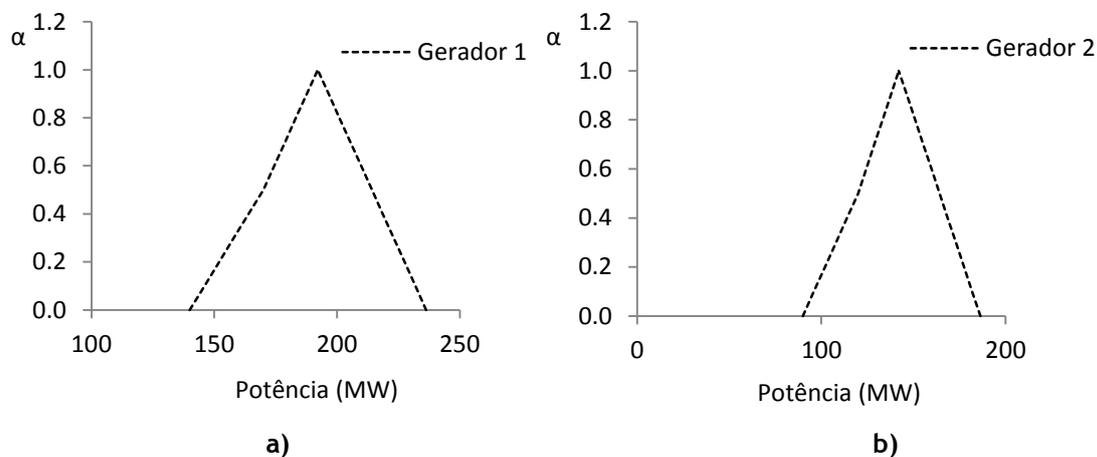


Figura 5.4 - Distribuição de possibilidade para a potência produzida nos geradores 1 (a) e 2 (b)

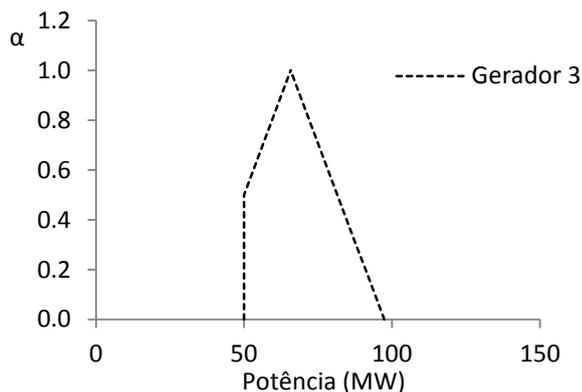


Figura 5.5 - Distribuição de possibilidade para a potência produzida no gerador 3

Os resultados dos trânsitos de potência difusos estão ilustrados nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8.

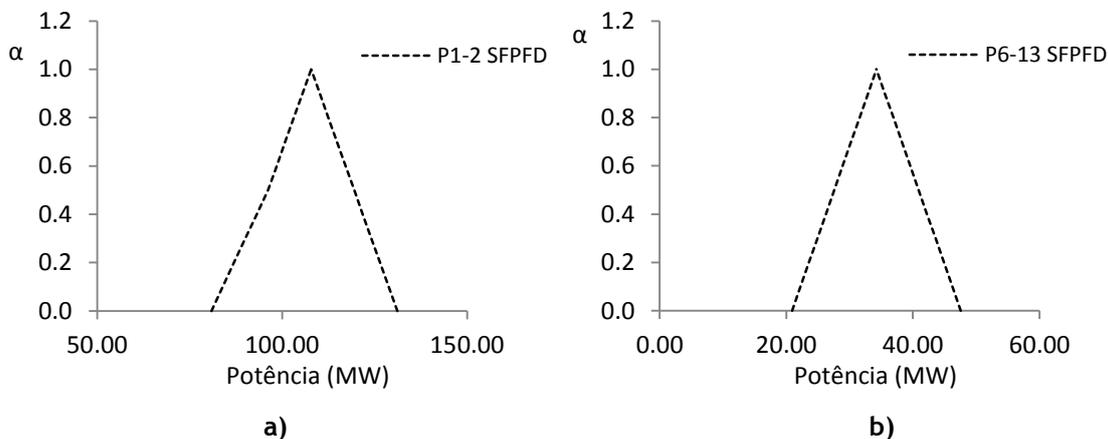


Figura 5.6 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 6-13 (b)

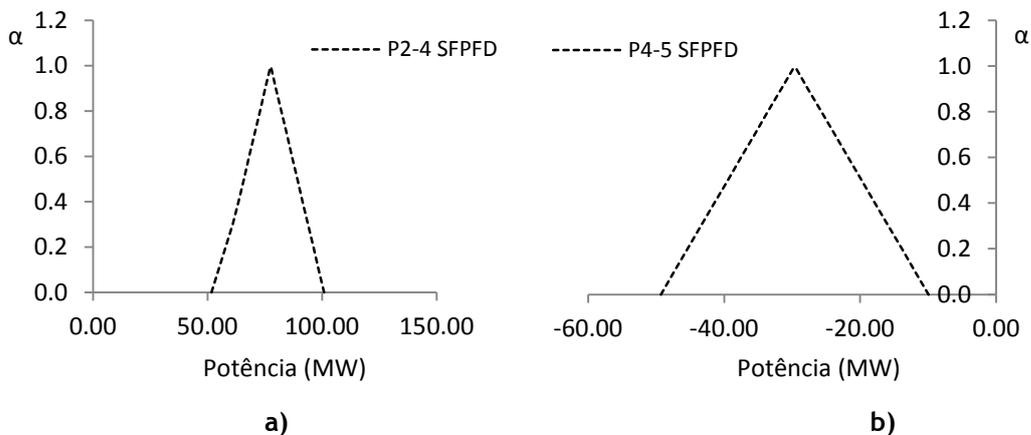


Figura 5.7 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 2-4 (a) e 4-5 (b)

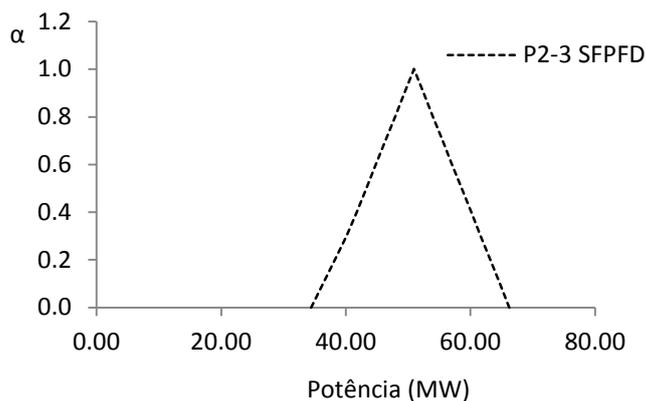


Figura 5.8 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 2-3

Observando as Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 pode-se analisar quais são os trânsitos de potência determinísticos possíveis em cada ramo, cujas produções resultam de um despacho óptimo. Uma informação importante que é possível observar, é a potência activa máxima no ramo. No ramo 1-2 a potência activa máxima é 131.1 MW.

As distribuições de possibilidade dos argumentos da tensão estão ilustradas nas figuras 5.9 e 5.10.

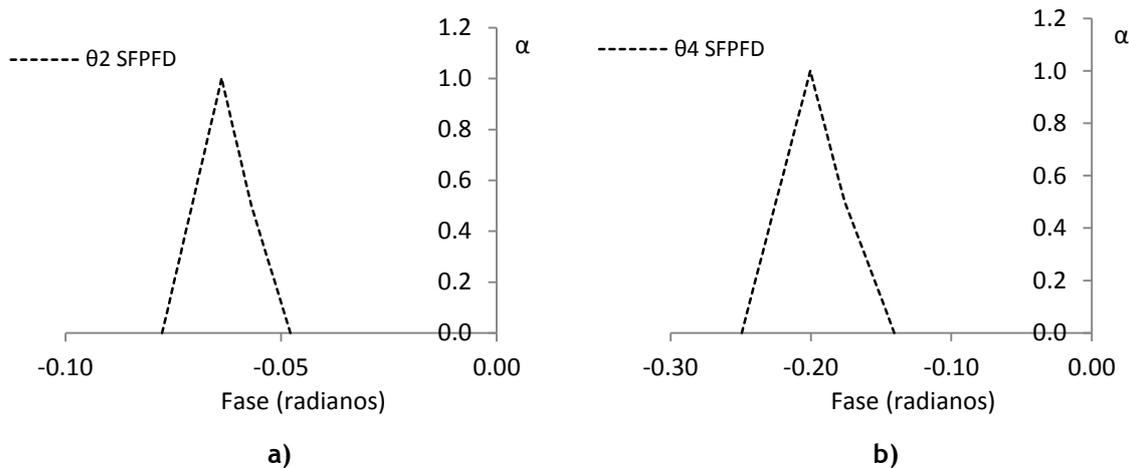


Figura 5.9 - Distribuição de possibilidade para a fase nos barramentos 2 (a) e 4 (b)

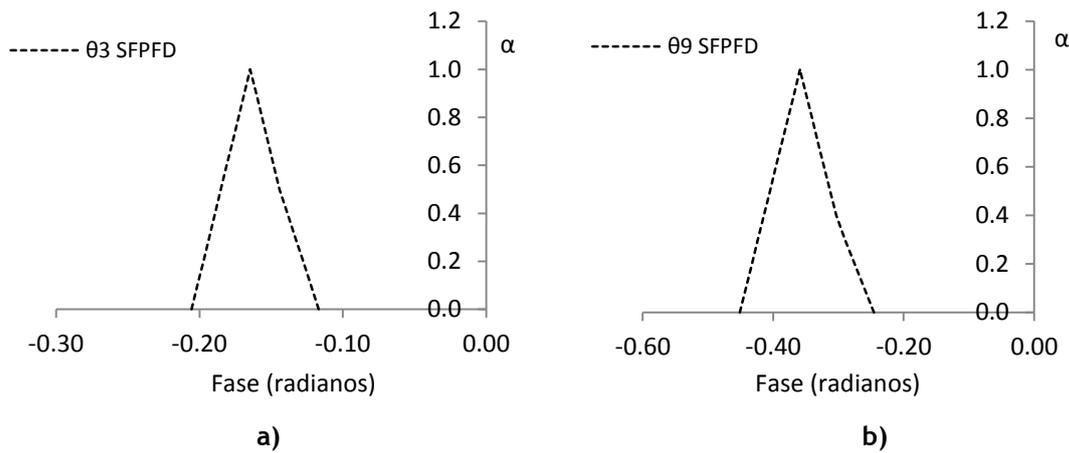


Figura 5.10 - Distribuição de possibilidade para a fase nos barramentos 3 (a) e 9 (b)

Tal como para os trânsitos de potência, nas Figuras 5.9 e 5.10 é possível observar quais são as fases determinísticas possíveis em cada barramento. Também é possível observar qual é o valor máximo e mínimo da fase.

A informação completa sobre os trânsitos de potência e as fases pode ser lida no Anexo B.

5.4. Comparação entre o SFPFD, o SFPF e o FPF

Nesta secção discutem-se as semelhanças e as diferenças entre o SFPFD, o SFPF [Matos e Gouveia, 2005; 2008] e o FPF [Miranda e Matos, 1989]. Para este efeito é utilizada a rede de 14 barramentos do IEEE (Figura 5.1).

Para calcular o trânsito de potência difuso a partir do FPF e SFPF utilizaram-se as distribuições de possibilidade obtidas através do SFPFD (Figura 5.4). Em seguida podem ser visualizadas algumas das distribuições comparando os três modelos.

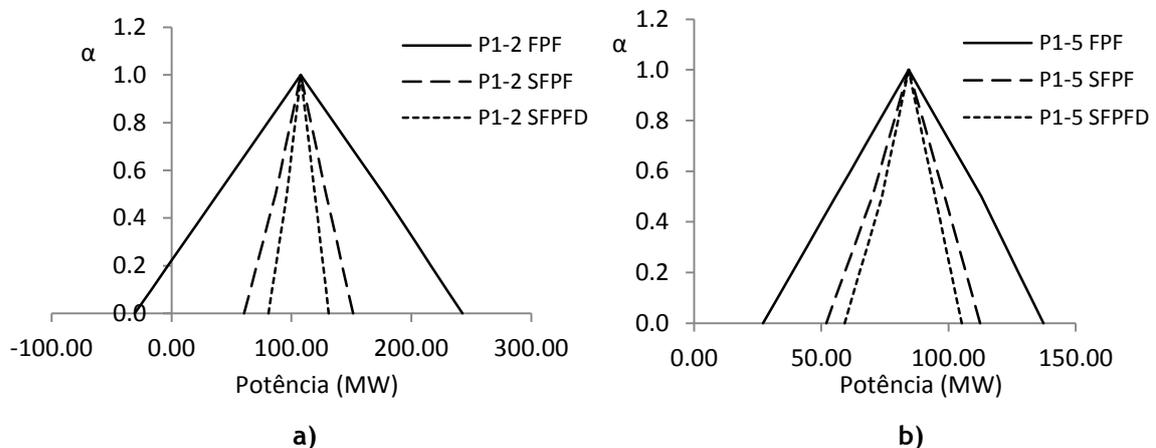


Figura 5.11 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 1-2 (a) e 1-5 (b)

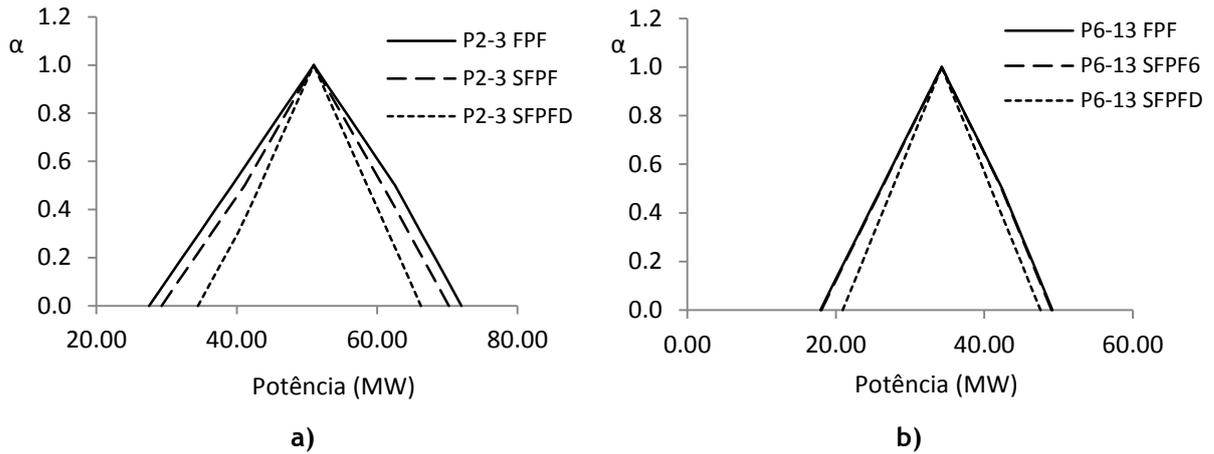


Figura 5.12 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 2-3 (a) e 6-13 (b)

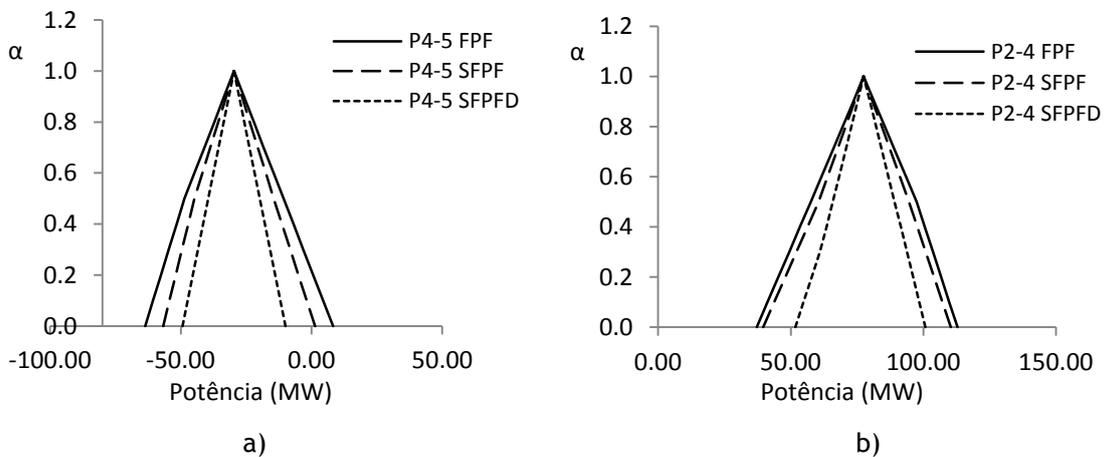


Figura 5.13 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 4-5 (a) e 2-4 (b)

No FPF, a incerteza cresce artificialmente com o aumento dos valores do trânsito de potências. O FPF admite todo o tipo de combinações de potências, o que por vezes gera trânsitos de potência determinísticos inviáveis.

No caso do SFPF apenas são permitidos trânsitos de potência determinísticos viáveis. No SFPFD apenas são permitidos trânsitos de potência determinísticos viáveis, cujas produções resultam de um despacho é ótimo.

Pode-se observar na Figura 5.11a, que para um corte de nível $\alpha=0$, o trânsito de potência máximo no ramo 1-2 é 243 MW, 151 MW e 108 MW para o FPF, SFPF e SFPFD respectivamente. Os trânsitos de potência entre 243 e 151 MW são trânsitos de potência inviáveis. De acordo com as considerações apresentadas anteriormente os trânsitos de potência maiores que 151 MW, são trânsitos de potência globalmente inviáveis. Para valores superiores a 151 MW não existe nenhum trânsito de potência determinístico viável, cujas potências injectadas correspondam às especificadas. O valor de 151 MW corresponde a um trânsito de potência, onde a potência injectada especificada é máxima.

Com base nestes resultados pode-se concluir, que a condição de dependência imposta pelo DODC limita a amplitude dos trânsitos de potência possíveis.

As distribuições de possibilidade das fases podem ser visualizadas nas figuras seguintes:

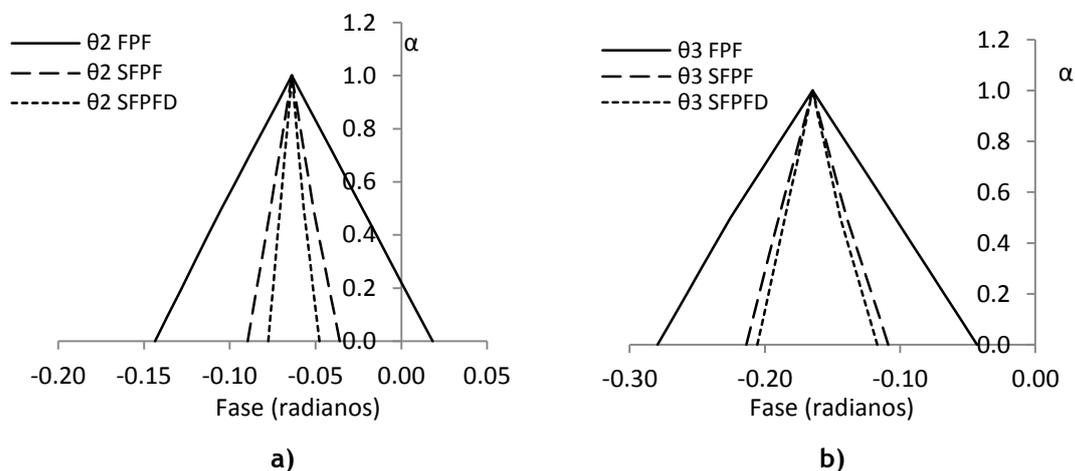


Figura 5.14 - Distribuição de possibilidade para a fase nos barramentos 2 (a) e 3 (b)

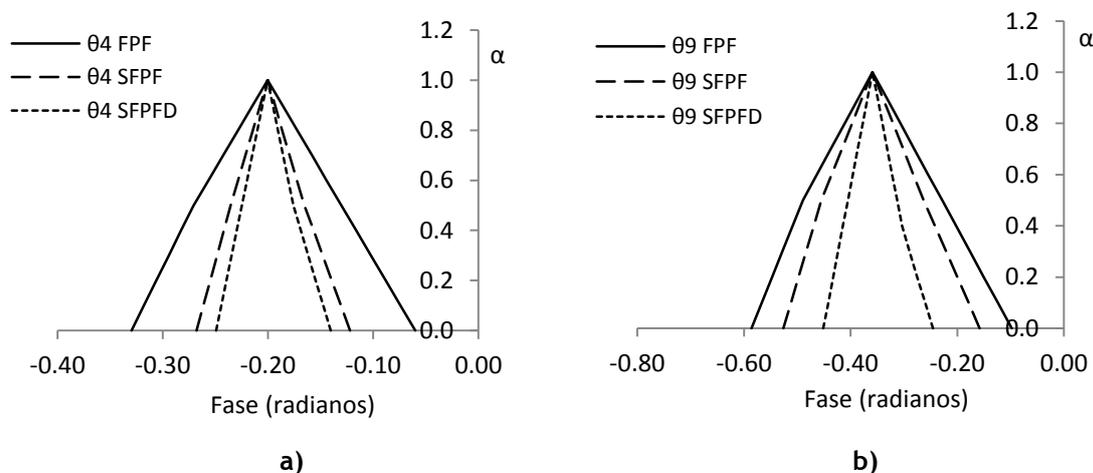


Figura 5.15 - Distribuição de possibilidade para a fase nos barramentos 4(a) e 9 (b)

A mesma análise que se fez em relação aos trânsitos de potência também se pode fazer em relação às fases. No FPF a incerteza cresce com o aumento dos valores das fases, criando-se situações de fases globalmente inviáveis. No caso do SFPF apenas são permitidos fases determinísticas viáveis. No SFPFD apenas são permitidos fases determinísticas viáveis, cujas produções resultam de um despacho é ótimo.

A informação completa sobre os trânsitos de potência e as fases pode ser lida no Anexo B.

Capítulo 6

Conclusões e desenvolvimentos futuros

6.1. Síntese do trabalho desenvolvido e conclusões genéricas

A necessidade de considerar incerteza do tipo não probabilístico no problema dos trânsitos de potência levou ao desenvolvimento do FPF. Mais tarde, com o objectivo de eliminar a assimetria existente nos métodos tradicionais foi desenvolvida a formulação SFPF.

Nos modelos tradicionais (FPF) e no SFPF parte-se do pressuposto que a produção é independente da carga, ou seja, as produções podem combinar-se de varias maneiras, de modo a satisfazer a carga total. Com a finalidade de incluir dependências entre produção e carga é proposta uma nova metodologia para o problema dos trânsitos de potências, o SFPFD.

O SFPFD é uma metodologia que permite calcular o trânsito de potências difuso, onde as dependências entre produção e consumo resultam da condição de optimização do despacho óptimo difuso conjunto (DODC), com base no pressuposto de que, para cada realização das incertezas das cargas, a produção será optimizada (minimização de custos de produção). A modelização foi feita sobre o modelo linearizado do trânsito de potências (modelo DC).

Os trânsitos de potência obtidos a partir do SFPFD resultam de uma combinação de produções, cujo despacho é óptimo. Isto significa que para um valor de carga total, só existe uma única combinação de produções, que minimiza o custo de produção global.

A metodologia desenvolvida e a sua aplicação a um sistema teste conhecido, permitem formular um conjunto de conclusões genéricas que se apresentam em seguida:

1. O modelo apresentado integra, de forma eficiente, dados representados por números difusos (cargas). Os resultados do SFPPD reflectem a incerteza dos dados sendo possível obter descrições mais adequadas e completas para os trânsitos de potências e para as fases;
2. O SFPPD permite analisar, de uma só vez, um número elevado de cenários subjacentes às incertezas dos dados. Desta forma, antevêm-se grandes potencialidades neste tipo de estudos por forma a substituir de modo mais eficiente, as metodologias determinísticas;
3. Tal como no SFPP, os resultados obtidos a partir do SFPPD são independentes do barramento de referência;
4. A condição de dependência imposta pelo despacho óptimo limita a amplitude dos trânsitos de potência possíveis. Ao contrário do SFPPD, o SFPP e o FPP pressupõem uma relação de independência entre produção e carga, o que gera mais trânsitos de potência possíveis, embora não associados a um despacho óptimo;
5. O SFPPD é uma metodologia onde apenas são permitidos trânsitos de potência determinísticos viáveis, cujas produções resultam de um despacho óptimo. O FPP admite todo o tipo de combinações de potências, o que por vezes gera trânsitos de potência determinísticos inviáveis. O SFPP é uma metodologia que apenas admite trânsitos de potência determinísticos viáveis.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Pode considerar-se que as actividades associadas à actividade humana nunca estarão terminadas. Por esta razão, não deverá estranhar-se que a dissertação possua uma natureza inacabada, pelo que são enumeradas em seguida, alguns temas que se considera poderem constituir novos pontos de partida ou permitir aprofundar conhecimentos:

1. O modelo de optimização 2 (OPT2) foi calculado com auxílio do Solver, do Excel. Poderia ser desenvolvido uma meta-heurística capaz de resolver o problema.
2. O modelo do SFPPD desenvolvido deverá ser encarado como uma primeira modelização do problema não considerando, por exemplo, limites nos ramos do

sistema. A integração dos limites é encarada como desejável por forma a aperfeiçoar o modelo. Esta inclusão pode ser feita de duas maneiras:

- 1) Inclusão simples dos limites dos ramos, no modelo de optimização 2

$$[P^{Min}] \leq [A] \cdot [P] \leq [P^{Max}] \quad (6.1)$$

- 2) Inclusão dos limites dos ramos, através da correcção do despacho
3. A modelização foi feita sobre o modelo linearizado do trânsito de potências (modelo DC). De forma a aperfeiçoar o modelo poder-se-ia desenvolver um modelo de natureza AC.

Referências bibliográficas

Al-Othman A K, (2011), “Economic Dispatch Fuzzy Linear Regression”, World Academy of Science, Engineering and Technology 74

Ahmadi-Khatir A, Motamedi A, Sadati N, Fallahi K, Fathi B, (2008), “Fuzzy Economic Dispatch and Spinning Reserve Allocation Using Evolutionary Programming”, *Power Symposium, 2008. NAPS '08. 40th North American*, vol., no., pp.1-5, 28-30 Sept.2008

Allan R N, Al-Shakarchi M R G, (1976), “Probabilistic Ac Load Flow”, IEEE Transactions on PAS, vol. 123, n.º 6, June 1976

Allan R N, Billinton R, (2000), “Probabilistic assessment of power systems”, Proceedings of the IEEE, Vol. 88, Issue 2, pp 140 - 162, February 2000

Allan R N, Silva A M L, (1983), “Probabilistic load flow using multilinearizations,” IEE. Proceedings, pt. C, vol. 130, no. 4, pp. 165-171, July 1983

Borkowska B, “Probabilistic Load Flow”, (1974), IEEE Transactions on PAS, vol. PAS-93, pp. 752-759

Dopazo J F, Klitin O A, Sasson A M, (1975), “Stochastic load flows”, IEEE Trans. Power Appar. Syst. PAS-94, Vol. PAS-94, nº2

Dimitrovsky A, and Tomsovic K, (2004), “Boundary load flow solutions”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 348-355, Feb. 2004

Gouveia E M, (2009), “Avaliação da adequação da rede de transporte de energia eléctrica em ambiente liberalizado”, Tese Doutorado, FEUP, Jan. 2009

Gouveia E M, Matos M A, (2007), "Constrained Fuzzy Power Flow", in Proceedings of IEEE PowerTech 2007, pp. 1314-1319, Lausanne, Switzerland, June 2007

Gouveia EM, Matos M A, (2006), "Detailed Calculation of Fuzzy Power Flow", Proceedings of the ORMES 2006, Coimbra, September 2006

Hu Z, Wang X, (2006), "A probabilistic load flow method considering branch outages", Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 21, Issue 2, pp 507 - 514, May 2006

Matos M A, Gouveia E M, (2008), "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, (2005), "The Fuzzy Power Flow Revisited", in Proceedings of IEEE PowerTech 2005, Saint Petersburg, June 2005

Miranda V, Matos M A, (1989), "Distribution System Planning with Fuzzy Models and Techniques", Proceedings of CIRED 89, Brighton, pp 472 - 476

Miranda V, Matos M A, Saraiva J T, (1989a) "Análise de redes com um novo conceito: Fluxo de cargas impreciso". ENDIEL 89, Porto, Portugal

Miranda V, (1996), "Despacho Económico de Sistemas de Produção - Transporte - de Energia Eléctrica", modelização e algoritmo

Miranda V, Matos M A, Saraiva J T, (1992), "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, Saraiva J T, (1992), "Fuzzy modeling of power system optimal load flow", IEEE Trans.on Power Systems, Vol. 7, no. 2, May 1992

Leite da Silva A M, Arienti V L, (1990), "Probabilistic load flow by a multilinear simulation algorithm," IEE Proc.-C Gen. Trans. Distri., Vol. 137, pp. 276-282, July 1990

Saraiva J T, (1992), "Aplicação de Conjuntos Imprecisos na Modelização e Planeamento de Sistemas Eléctricos", PhD Tesis, FEUP

Saraiva J T, Fonseca N, Matos M A, (2004), “Fuzzy Power Flow - An AC Model Addressing Correlated Data”, in: Proc PMAPS’04, Ames, Iowa, September 2004

Saraiva J T, Miranda V, (1993), “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, (1991), “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, (1994a) “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

Saraiva T J, Miranda V, (1994), “Flexible power system reinforcement planning under uncertainty”, Electrotechnical Conference, 1994. Proceedings, 7th Mediterranean, Vol. 3, pp: 913-916, April 1994

Stott B, Alsac O, (1972), “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, (1974), “Fast Decoupled Load Flow”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume: PAS-93, Issue 3, pp 859-869, May 1974

Ferreira M S, Silva S P, (2004), “Á procura do OPF Difuso”, Tese de Licenciatura, FEUP

Ferreira J R, (1999), “Avaliação da estabilidade de tensão com cenários de injeção imprecisos e identificação de procedimentos de controlo”, Tese de Doutoramento, FEUP

Tinney W F, Hart C E, (1967), “Power Flow Solutions by Newton’s method”, IEEE Transactions, Power Apparatus and Systems, Vol. 86, pp 1449, November 1967

Ward J B, Hale H M, (1956), “Digital Solution of power flow problems”, Transactions AIEE, Vol.75, Part III, pp 398-404

Zadeh L A, (1965), “Fuzzy Sets, Information and Control”, no. 8, pp 338-353, August 1965

Zadeh L A, (1978), "Fuzzy Sets as the Basis for a Theory of Possibility", Fuzzy Sets and Systems 1:3-28

Zimmermann H J, (1991), "Fuzzy set theory and its applications", second ed., Kluwer Academic Publishers

Anexo A

Método iterativo de lambda

Neste anexo é apresentado o método iterativo de lambda para o cálculo do despacho ótimo. Foi desenvolvido um algoritmo para este efeito.

Algoritmo

Assumir λ^L e λ^H tal que

$$\sum_{i=1}^n P_i^G(\lambda^L) - P^C < 0 \quad \sum_{i=1}^n P_i^G(\lambda^H) - P^C > 0$$

Enquanto $|\lambda^H - \lambda^L| > \varepsilon$ faça

$$\lambda^M = \frac{\lambda^H + \lambda^L}{2}$$

$$P_i^G = \frac{\lambda^M - b_i}{2 \cdot c_i}$$

Se $P_i^G > P_i^{G \text{ Max}}$ então

$$P_i^G = P_i^{G \text{ Max}}$$

Fim de Se

Se $P_i^G < P_i^{G \text{ Min}}$ então

$$P_i^G = P_i^{G \text{ Min}}$$

Fim de Se

Se $\sum_{i=1}^n P_i^G - P^C > 0$ então

$$\lambda^H = \lambda^M$$

Fim de Se

Se $\sum_{i=1}^n P_i^G - P^C < 0$ então

$$\lambda^L = \lambda^M$$

Fim de Se

Fim do Enquanto

Onde:

b_i, c_i - Constantes da função custo associadas ao gerador i , b_i , em €/h.MW e c_i em €/h.MW²

ε - Tolerância de convergência (*valor típico* 10^{-6})

P_i^G - Potência produzida pelo gerador i

P^C - Carga total do sistema

$P_i^{G Min}$ - Limite mínimo de produção do gerador i

$P_i^{G Max}$ - Limite máximo de produção do gerador i

O critério de convergência adoptado foi a diferença entre valores de λ , mas podia ter sido adoptado outro, como por exemplo a diferença de custo total entre duas iterações consecutivas.

Anexo B

Resultados da rede de 14 barramentos do IEEE

Em seguida são apresentados alguns dos resultados relativos à aplicação do SFPFD/SFPF/FPF. A maior parte dos resultados principais estão disponíveis nos respectivos capítulos. Os resultados que se apresentam referem-se sobretudo aos valores obtidos para os cortes de nível α . Estão assim disponíveis os resultados para a rede de 14 barramentos do IEEE.

Tabela B.1 - Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência activos (MW) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo SFPPD para a rede de 14 barramentos do Capítulo 5: ramo 1-2 a ramo 13-14

P_{i-k}	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
P 1-2	80.8	83.9	87.0	90.0	93.1	96.2	98.5	100.8	103.2	105.5	107.8	110.1	112.5	114.8	117.1	119.5	121.8	124.1	126.5	128.8	131.1
P 1-5	59.2	62.1	65.0	68.0	70.9	73.8	75.9	78.0	80.1	82.2	84.3	86.4	88.5	90.6	92.7	94.7	96.8	98.9	101.0	103.1	105.2
P 2-3	34.5	36.3	38.2	40.1	41.8	43.3	44.8	46.4	47.9	49.4	51.0	52.5	54.0	55.5	57.1	58.6	60.1	61.7	63.2	64.7	66.3
P 2-4	51.7	54.8	57.9	61.0	63.6	65.9	68.2	70.5	72.9	75.2	77.5	79.9	82.2	84.5	86.8	89.2	91.5	93.8	96.2	98.5	100.8
P 2-5	-1.2	0.4	2.0	3.4	4.8	6.3	7.7	9.1	10.6	12.0	13.4	14.9	16.3	17.7	19.2	20.6	22.0	23.5	24.9	26.3	27.8
P 3-4	5.3	7.1	8.8	10.3	11.8	13.4	14.9	16.4	17.9	19.4	21.0	22.5	24.0	25.5	27.0	28.5	30.1	31.6	33.1	34.6	36.1
P 4-5	-49.3	-47.4	-45.4	-43.4	-41.5	-39.5	-37.5	-35.5	-33.6	-31.6	-29.6	-27.7	-25.7	-23.7	-21.8	-19.8	-17.8	-15.9	-13.9	-11.9	-9.9
P 4-7	27.5	29.7	31.9	34.1	36.4	38.6	40.8	43.0	45.2	47.4	49.6	51.8	54.1	56.3	58.5	60.7	62.9	65.1	67.3	69.5	71.8
P 4-9	15.8	17.1	18.3	19.6	20.9	22.1	23.4	24.7	25.9	27.2	28.5	29.7	31.0	32.3	33.6	34.8	36.1	37.4	38.6	39.9	41.2
P 5-6	56.7	59.6	62.5	65.5	68.4	71.4	74.3	77.3	80.2	83.2	86.1	89.0	92.0	94.9	97.9	100.8	103.8	106.7	109.6	112.6	115.5
P 6-11	82.8	87.4	91.9	96.4	100.9	105.4	109.9	114.4	119.0	123.5	128.0	132.5	137.0	141.5	146.1	150.6	155.1	159.6	164.1	168.6	173.1
P 6-12	15.2	16.0	16.7	17.5	18.3	19.1	19.8	20.6	21.4	22.2	22.9	23.7	24.5	25.3	26.1	26.8	27.6	28.4	29.2	29.9	30.7
P 6-13	20.9	22.3	23.6	24.9	26.3	27.6	28.9	30.2	31.6	32.9	34.2	35.6	36.9	38.2	39.6	40.9	42.2	43.6	44.9	46.2	47.6
P 7-8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
P 7-9	27.5	29.7	31.9	34.1	36.4	38.6	40.8	43.0	45.2	47.4	49.6	51.8	54.1	56.3	58.5	60.7	62.9	65.1	67.3	69.5	71.8
P 9-10	30.3	32.3	34.3	36.3	38.4	40.5	42.6	44.7	46.9	49.0	51.1	53.2	55.3	57.5	59.6	61.7	63.8	66.0	68.1	70.2	72.3
P 9-14	25.6	27.2	28.8	30.6	32.3	34.1	35.8	37.6	39.3	41.1	42.8	44.6	46.3	48.0	49.8	51.5	53.3	55.0	56.8	58.5	60.3
P 10-11	4.8	6.3	7.9	9.5	11.2	12.8	14.5	16.1	17.8	19.4	21.1	22.7	24.4	26.0	27.7	29.3	31.0	32.6	34.3	36.0	37.6
P 12-13	-14.6	-13.8	-13.1	-12.3	-11.6	-10.8	-10.1	-9.3	-8.6	-7.8	-7.1	-6.3	-5.5	-4.8	-4.0	-3.3	-2.5	-1.8	-1.0	-0.3	0.5
P 13-14	-6.2	-4.9	-3.5	-2.2	-0.9	0.5	1.8	3.2	4.5	5.9	7.2	8.5	9.9	11.2	12.6	13.9	15.2	16.6	17.9	19.3	20.6

Tabela B.2 - Resultados para as distribuições de possibilidade da potência activa gerada (MW), por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo SFPFD para um sistema de 3 geradores do Capítulo 5

PG_i	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
PG 1	140.0	146.0	152.0	158.0	164.0	170.0	174.4	178.8	183.3	187.7	192.1	196.5	200.9	205.4	209.8	214.2	218.6	223.1	227.5	231.9	236.3
PG 2	90.0	96.0	102.0	108.0	114.0	120.0	124.4	128.8	133.3	137.7	142.1	146.5	150.9	155.4	159.8	164.2	168.6	173.1	177.5	181.9	186.3
PG 3	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	53.2	56.3	59.5	62.6	65.8	68.9	72.1	75.3	78.4	81.6	84.7	87.9	91.1	94.2	97.4

Tabela B.3 - Resultados para as distribuições de possibilidade dos ângulos das tensões (radianos), por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo SFPFD para a rede de 14 barramentos do Capítulo 5

θ_i	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
θ_1	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
θ_2	-0.08	-0.08	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
θ_3	-0.21	-0.20	-0.20	-0.19	-0.19	-0.19	-0.18	-0.18	-0.17	-0.17	-0.16	-0.16	-0.16	-0.15	-0.15	-0.14	-0.14	-0.13	-0.13	-0.12	-0.12
θ_4	-0.25	-0.24	-0.24	-0.23	-0.23	-0.22	-0.22	-0.22	-0.21	-0.21	-0.20	-0.20	-0.19	-0.19	-0.18	-0.18	-0.17	-0.16	-0.15	-0.15	-0.14
θ_5	-0.23	-0.23	-0.23	-0.22	-0.22	-0.21	-0.21	-0.20	-0.20	-0.19	-0.19	-0.18	-0.18	-0.17	-0.17	-0.16	-0.16	-0.15	-0.15	-0.14	-0.13
θ_6	-0.51	-0.50	-0.49	-0.48	-0.47	-0.46	-0.45	-0.44	-0.43	-0.42	-0.40	-0.39	-0.38	-0.37	-0.36	-0.35	-0.34	-0.32	-0.31	-0.30	-0.28
θ_7	-0.38	-0.37	-0.37	-0.36	-0.35	-0.34	-0.33	-0.33	-0.32	-0.31	-0.30	-0.30	-0.29	-0.28	-0.27	-0.27	-0.26	-0.25	-0.23	-0.22	-0.21
θ_8	-0.38	-0.37	-0.37	-0.36	-0.35	-0.34	-0.33	-0.33	-0.32	-0.31	-0.30	-0.30	-0.29	-0.28	-0.27	-0.27	-0.26	-0.25	-0.23	-0.22	-0.21
θ_9	-0.45	-0.44	-0.43	-0.42	-0.41	-0.41	-0.40	-0.39	-0.38	-0.37	-0.36	-0.35	-0.34	-0.33	-0.32	-0.31	-0.30	-0.29	-0.28	-0.26	-0.25
θ_{10}	-0.51	-0.50	-0.49	-0.48	-0.47	-0.45	-0.44	-0.43	-0.42	-0.41	-0.40	-0.39	-0.38	-0.37	-0.36	-0.35	-0.34	-0.32	-0.31	-0.29	-0.28
θ_{11}	-0.56	-0.55	-0.54	-0.52	-0.51	-0.50	-0.49	-0.48	-0.47	-0.45	-0.44	-0.43	-0.42	-0.41	-0.40	-0.38	-0.37	-0.35	-0.34	-0.32	-0.31
θ_{12}	-0.59	-0.58	-0.56	-0.55	-0.54	-0.53	-0.51	-0.50	-0.49	-0.48	-0.46	-0.45	-0.44	-0.43	-0.41	-0.40	-0.39	-0.37	-0.35	-0.34	-0.32
θ_{13}	-0.57	-0.56	-0.55	-0.53	-0.52	-0.51	-0.50	-0.49	-0.47	-0.46	-0.45	-0.44	-0.43	-0.41	-0.40	-0.39	-0.38	-0.36	-0.34	-0.33	-0.31
θ_{14}	-0.60	-0.59	-0.58	-0.56	-0.55	-0.54	-0.53	-0.51	-0.50	-0.49	-0.47	-0.46	-0.45	-0.44	-0.42	-0.41	-0.40	-0.38	-0.36	-0.35	-0.33

Tabela B.4 - Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência activos (MW) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo SFPF para a rede de 14 barramentos do Capítulo 5: ramo 1-2 a ramo 13-14

P_{i-k}	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
P 1-2	60.6	65.8	71.0	76.3	81.5	86.8	91.0	95.2	99.4	103.6	107.8	112.0	116.2	120.4	124.7	128.9	133.4	137.9	142.4	146.9	151.4
P 1-5	51.9	55.5	59.2	62.8	66.4	70.1	72.9	75.8	78.6	81.5	84.3	87.1	90.0	92.8	95.7	98.5	101.3	104.1	106.9	109.7	112.4
P 2-3	29.3	31.6	34.0	36.3	38.7	41.1	43.1	45.1	47.0	49.0	51.0	52.9	54.9	56.8	58.8	60.8	62.7	64.6	66.5	68.3	70.2
P 2-4	39.7	43.8	48.0	52.1	56.3	60.5	63.9	67.3	70.7	74.1	77.5	80.9	84.3	87.7	91.1	94.6	97.7	100.9	104.1	107.2	110.4
P 2-5	-5.5	-3.5	-1.6	0.4	2.4	4.3	6.2	8.0	9.8	11.6	13.4	15.2	17.1	18.9	20.7	22.5	24.2	25.9	27.6	29.3	30.9
P 3-4	-1.9	0.5	3.0	5.4	7.9	10.4	12.5	14.6	16.7	18.8	21.0	23.1	25.2	27.3	29.4	31.5	33.5	35.5	37.5	39.5	41.4
P 4-5	-56.7	-54.4	-52.0	-49.6	-47.2	-44.8	-41.8	-38.7	-35.7	-32.7	-29.6	-26.6	-23.6	-20.5	-17.5	-14.5	-11.3	-8.2	-5.0	-1.8	1.3
P 4-7	10.7	14.6	18.5	22.4	26.3	30.2	34.1	38.0	41.9	45.7	49.6	53.5	57.4	61.3	65.2	69.1	71.5	74.0	76.5	78.9	81.4
P 4-9	6.2	8.4	10.6	12.9	15.1	17.3	19.6	21.8	24.0	26.2	28.5	30.7	32.9	35.2	37.4	39.6	41.0	42.5	43.9	45.3	46.7
P 5-6	45.1	49.2	53.3	57.4	61.6	65.7	69.8	73.9	77.9	82.0	86.1	90.2	94.3	98.3	102.4	106.5	109.7	112.9	116.1	119.3	122.5
P 6-11	61.3	68.0	74.7	81.3	88.1	94.8	101.4	108.1	114.7	121.4	128.0	134.6	141.3	147.9	154.5	161.2	166.2	171.2	176.2	181.2	186.2
P 6-12	14.4	15.2	16.1	16.9	17.8	18.7	19.5	20.4	21.2	22.1	22.9	23.8	24.7	25.5	26.4	27.2	28.0	28.8	29.6	30.3	31.1
P 6-13	18.0	19.7	21.3	22.9	24.5	26.1	27.8	29.4	31.0	32.6	34.2	35.9	37.5	39.1	40.7	42.3	43.7	45.0	46.4	47.7	49.0
P 7-8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
P 7-9	10.7	14.6	18.5	22.4	26.3	30.2	34.1	38.0	41.9	45.7	49.6	53.5	57.4	61.3	65.2	69.1	71.5	74.0	76.5	78.9	81.4
P 9-10	29.6	31.5	33.3	35.2	37.1	39.0	41.4	43.8	46.3	48.7	51.1	53.5	55.9	58.4	60.8	63.2	65.6	68.1	70.5	72.9	75.4
P 9-14	25.2	26.8	28.4	30.0	31.5	33.1	35.1	37.0	38.9	40.9	42.8	44.7	46.7	48.6	50.6	52.5	54.4	56.4	58.3	60.3	62.2
P 10-11	3.5	5.0	6.5	8.0	9.5	10.9	13.0	15.0	17.0	19.1	21.1	23.1	25.2	27.2	29.2	31.3	33.3	35.3	37.4	39.4	41.4
P 12-13	-15.3	-14.5	-13.6	-12.8	-12.0	-11.2	-10.3	-9.5	-8.7	-7.9	-7.1	-6.2	-5.4	-4.6	-3.8	-2.9	-2.2	-1.5	-0.7	0.0	0.8
P 13-14	-9.1	-7.4	-5.8	-4.2	-2.6	-0.9	0.7	2.3	3.9	5.6	7.2	8.8	10.4	12.1	13.7	15.3	16.6	17.8	19.1	20.4	21.6

Tabela B.5 - Resultados para as distribuições de possibilidade dos ângulos das tensões (radianos), por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo SFPF para a rede de 14 barramentos do Capítulo 5

θ_i	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0	
θ_1	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
θ_2	-0.09	-0.09	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
θ_3	-0.21	-0.21	-0.20	-0.20	-0.19	-0.19	-0.18	-0.18	-0.17	-0.17	-0.16	-0.16	-0.15	-0.15	-0.14	-0.14	-0.13	-0.13	-0.12	-0.11	-0.11	-0.11
θ_4	-0.27	-0.26	-0.25	-0.25	-0.24	-0.24	-0.23	-0.22	-0.21	-0.21	-0.20	-0.19	-0.19	-0.18	-0.17	-0.17	-0.16	-0.15	-0.14	-0.13	-0.13	-0.12
θ_5	-0.25	-0.24	-0.24	-0.23	-0.23	-0.22	-0.21	-0.21	-0.20	-0.19	-0.19	-0.18	-0.18	-0.17	-0.16	-0.16	-0.15	-0.14	-0.13	-0.12	-0.12	-0.12
θ_6	-0.56	-0.54	-0.53	-0.52	-0.50	-0.49	-0.47	-0.45	-0.44	-0.42	-0.40	-0.39	-0.37	-0.36	-0.34	-0.32	-0.30	-0.29	-0.27	-0.25	-0.23	-0.23
θ_7	-0.44	-0.43	-0.41	-0.40	-0.39	-0.38	-0.36	-0.35	-0.33	-0.32	-0.30	-0.29	-0.27	-0.26	-0.24	-0.23	-0.21	-0.20	-0.18	-0.16	-0.15	-0.15
θ_8	-0.44	-0.43	-0.41	-0.40	-0.39	-0.38	-0.36	-0.35	-0.33	-0.32	-0.30	-0.29	-0.27	-0.26	-0.24	-0.23	-0.21	-0.20	-0.18	-0.16	-0.15	-0.15
θ_9	-0.53	-0.51	-0.50	-0.48	-0.47	-0.45	-0.44	-0.42	-0.40	-0.38	-0.36	-0.34	-0.32	-0.30	-0.28	-0.26	-0.24	-0.22	-0.20	-0.18	-0.16	-0.16
θ_{10}	-0.58	-0.56	-0.55	-0.53	-0.52	-0.50	-0.48	-0.46	-0.44	-0.42	-0.40	-0.38	-0.36	-0.34	-0.32	-0.30	-0.28	-0.26	-0.24	-0.22	-0.20	-0.20
θ_{11}	-0.62	-0.60	-0.59	-0.57	-0.55	-0.54	-0.52	-0.50	-0.48	-0.46	-0.44	-0.42	-0.40	-0.38	-0.37	-0.35	-0.33	-0.30	-0.28	-0.26	-0.24	-0.24
θ_{12}	-0.64	-0.62	-0.60	-0.59	-0.57	-0.56	-0.54	-0.52	-0.50	-0.48	-0.46	-0.45	-0.43	-0.41	-0.39	-0.37	-0.35	-0.33	-0.31	-0.29	-0.27	-0.27
θ_{13}	-0.62	-0.60	-0.59	-0.57	-0.56	-0.54	-0.52	-0.50	-0.49	-0.47	-0.45	-0.43	-0.41	-0.39	-0.38	-0.36	-0.34	-0.32	-0.30	-0.28	-0.26	-0.26
θ_{14}	-0.67	-0.65	-0.63	-0.61	-0.60	-0.58	-0.56	-0.54	-0.52	-0.50	-0.47	-0.45	-0.43	-0.41	-0.39	-0.37	-0.35	-0.32	-0.30	-0.28	-0.25	-0.25

Tabela B.6 - Resultados para as distribuições de possibilidade dos trânsitos de potência activos (MW) por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo FPF para a rede de 14 barramentos do Capítulo 5 : ramo 1-2 a ramo 13-14

P_{i-k}	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
P 1-2	-30.8	-16.9	-3.0	10.8	24.7	38.5	52.4	66.2	80.1	94.0	107.8	121.7	135.5	149.4	163.2	177.1	190.2	203.3	216.5	229.6	242.7
P 1-5	27.1	32.8	38.5	44.2	50.0	55.7	61.4	67.1	72.9	78.6	84.3	90.0	95.7	101.5	107.2	112.9	117.8	122.7	127.5	132.4	137.3
P 2-3	27.5	29.9	32.2	34.6	37.0	39.3	41.7	44.0	46.3	48.6	51.0	53.3	55.6	57.9	60.2	62.6	64.5	66.3	68.2	70.1	72.0
P 2-4	37.2	41.3	45.3	49.4	53.5	57.6	61.6	65.6	69.5	73.5	77.5	81.5	85.5	89.5	93.5	97.5	100.6	103.6	106.7	109.8	112.9
P 2-5	-5.5	-3.6	-1.6	0.3	2.2	4.1	6.0	7.9	9.7	11.6	13.4	15.3	17.1	19.0	20.9	22.7	24.4	26.0	27.6	29.3	30.9
P 3-4	-1.9	0.4	2.7	5.0	7.3	9.6	11.9	14.2	16.4	18.7	21.0	23.2	25.5	27.7	30.0	32.3	34.1	35.9	37.8	39.6	41.4
P 4-5	-63.6	-60.6	-57.6	-54.6	-51.6	-48.6	-44.8	-41.0	-37.2	-33.4	-29.6	-25.9	-22.1	-18.3	-14.5	-10.7	-6.9	-3.2	0.6	4.4	8.2
P 4-7	10.7	14.6	18.5	22.4	26.3	30.2	34.1	38.0	41.9	45.7	49.6	53.5	57.4	61.3	65.2	69.1	71.5	74.0	76.5	78.9	81.4
P 4-9	6.2	8.4	10.6	12.9	15.1	17.3	19.6	21.8	24.0	26.2	28.5	30.7	32.9	35.2	37.4	39.6	41.0	42.5	43.9	45.3	46.7
P 5-6	44.6	48.7	52.9	57.0	61.2	65.3	69.5	73.6	77.8	81.9	86.1	90.2	94.4	98.5	102.7	106.8	110.1	113.3	116.6	119.8	123.1
P 6-11	60.3	67.1	73.8	80.6	87.4	94.1	100.9	107.7	114.5	121.2	128.0	134.8	141.5	148.3	155.1	161.8	166.9	172.0	177.1	182.1	187.2
P 6-12	14.3	15.2	16.1	16.9	17.8	18.6	19.5	20.4	21.2	22.1	22.9	23.8	24.7	25.5	26.4	27.3	28.0	28.8	29.6	30.4	31.2
P 6-13	17.9	19.5	21.2	22.8	24.4	26.1	27.7	29.3	31.0	32.6	34.2	35.9	37.5	39.1	40.8	42.4	43.8	45.1	46.5	47.8	49.2
P 7-8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
P 7-9	10.7	14.6	18.5	22.4	26.3	30.2	34.1	38.0	41.9	45.7	49.6	53.5	57.4	61.3	65.2	69.1	71.5	74.0	76.5	78.9	81.4
P 9-10	29.5	31.4	33.2	35.1	37.0	38.9	41.3	43.8	46.2	48.7	51.1	53.5	56.0	58.4	60.8	63.3	65.7	68.2	70.6	73.0	75.5
P 9-14	25.2	26.7	28.3	29.9	31.5	33.1	35.0	37.0	38.9	40.9	42.8	44.8	46.7	48.6	50.6	52.5	54.5	56.4	58.4	60.3	62.3
P 10-11	3.3	4.8	6.3	7.8	9.3	10.9	12.9	14.9	17.0	19.0	21.1	23.1	25.2	27.2	29.3	31.3	33.4	35.4	37.5	39.5	41.6
P 12-13	-15.3	-14.5	-13.7	-12.8	-12.0	-11.2	-10.4	-9.5	-8.7	-7.9	-7.1	-6.2	-5.4	-4.6	-3.7	-2.9	-2.2	-1.4	-0.7	0.1	0.8
P 13-14	-9.2	-7.5	-5.9	-4.3	-2.6	-1.0	0.7	2.3	3.9	5.6	7.2	8.8	10.5	12.1	13.7	15.4	16.6	17.9	19.2	20.5	21.7

Tabela B.7 - Resultados para as distribuições de possibilidade dos ângulos das tensões (radianos), por corte de nível α em passos de 0.1 calculados pelo FPF para a rede de 14 barramentos do Capítulo 5

θ_i	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0	
$\Theta 1$	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
$\Theta 2$	-0.14	-0.14	-0.13	-0.12	-0.11	-0.10	-0.10	-0.09	-0.08	-0.07	-0.06	-0.06	-0.05	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	-0.01	0.00	0.01	0.02	
$\Theta 3$	-0.28	-0.27	-0.26	-0.25	-0.24	-0.23	-0.21	-0.20	-0.19	-0.18	-0.16	-0.15	-0.14	-0.13	-0.12	-0.10	-0.09	-0.08	-0.07	-0.06	-0.04	
$\Theta 4$	-0.33	-0.32	-0.31	-0.29	-0.28	-0.27	-0.26	-0.24	-0.23	-0.21	-0.20	-0.19	-0.17	-0.16	-0.14	-0.13	-0.12	-0.10	-0.09	-0.07	-0.06	
$\Theta 5$	-0.31	-0.30	-0.28	-0.27	-0.26	-0.25	-0.24	-0.23	-0.21	-0.20	-0.19	-0.18	-0.16	-0.15	-0.14	-0.12	-0.11	-0.10	-0.09	-0.07	-0.06	
$\Theta 6$	-0.62	-0.60	-0.58	-0.56	-0.54	-0.52	-0.50	-0.47	-0.45	-0.43	-0.40	-0.38	-0.36	-0.34	-0.31	-0.29	-0.27	-0.24	-0.22	-0.20	-0.17	
$\Theta 7$	-0.50	-0.48	-0.46	-0.45	-0.43	-0.41	-0.39	-0.37	-0.35	-0.33	-0.30	-0.28	-0.26	-0.24	-0.22	-0.19	-0.17	-0.15	-0.13	-0.11	-0.08	
$\Theta 8$	-0.50	-0.48	-0.46	-0.45	-0.43	-0.41	-0.39	-0.37	-0.35	-0.33	-0.30	-0.28	-0.26	-0.24	-0.22	-0.19	-0.17	-0.15	-0.13	-0.11	-0.08	
$\Theta 9$	-0.59	-0.57	-0.55	-0.53	-0.51	-0.49	-0.46	-0.44	-0.41	-0.38	-0.36	-0.33	-0.31	-0.28	-0.25	-0.23	-0.20	-0.18	-0.15	-0.12	-0.10	
$\Theta 10$	-0.64	-0.62	-0.60	-0.58	-0.56	-0.54	-0.51	-0.48	-0.46	-0.43	-0.40	-0.38	-0.35	-0.32	-0.30	-0.27	-0.24	-0.22	-0.19	-0.16	-0.14	
$\Theta 11$	-0.68	-0.66	-0.64	-0.61	-0.59	-0.57	-0.55	-0.52	-0.49	-0.47	-0.44	-0.42	-0.39	-0.36	-0.34	-0.31	-0.29	-0.26	-0.23	-0.21	-0.18	
$\Theta 12$	-0.69	-0.67	-0.65	-0.63	-0.61	-0.59	-0.56	-0.54	-0.51	-0.49	-0.46	-0.44	-0.41	-0.39	-0.36	-0.34	-0.31	-0.29	-0.26	-0.24	-0.21	
$\Theta 13$	-0.68	-0.66	-0.64	-0.62	-0.60	-0.57	-0.55	-0.52	-0.50	-0.47	-0.45	-0.42	-0.40	-0.37	-0.35	-0.32	-0.30	-0.27	-0.25	-0.22	-0.20	
$\Theta 14$	-0.73	-0.70	-0.68	-0.66	-0.64	-0.61	-0.59	-0.56	-0.53	-0.50	-0.47	-0.45	-0.42	-0.39	-0.36	-0.33	-0.31	-0.28	-0.25	-0.22	-0.20	

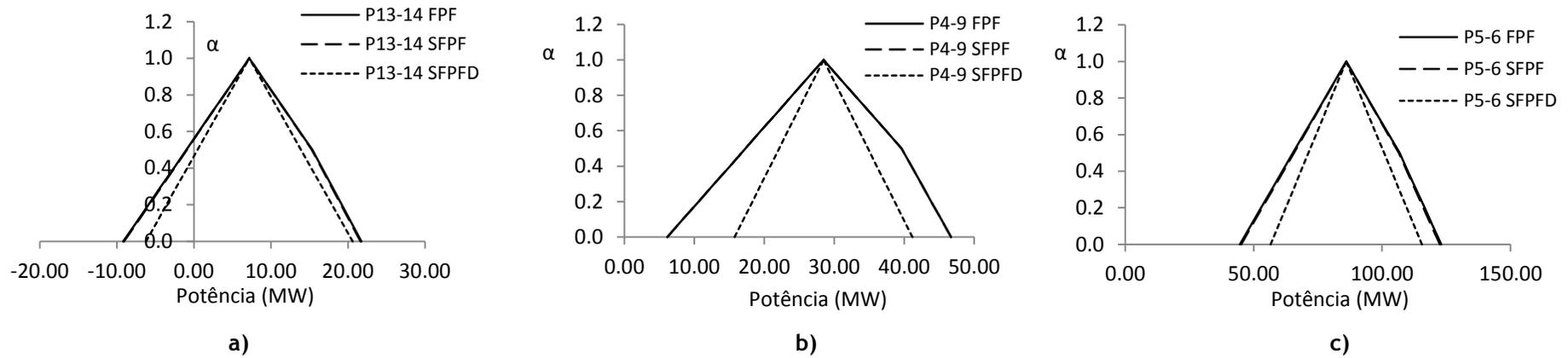


Figura B.1 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 13-14 (a), 4-9 (b) e 5-6 (c): rede de 14 barramentos IEEE, secção 5.4

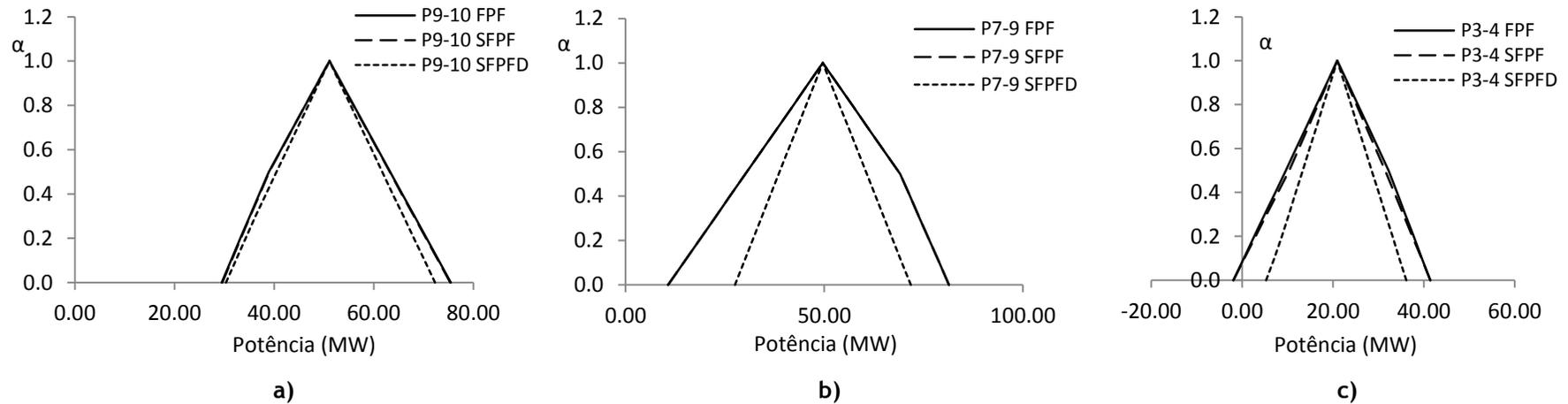


Figura B.2 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 9-10 (a), 7-9 (b) e 3-4 (c): rede de 14 barramentos IEEE, secção 5.4

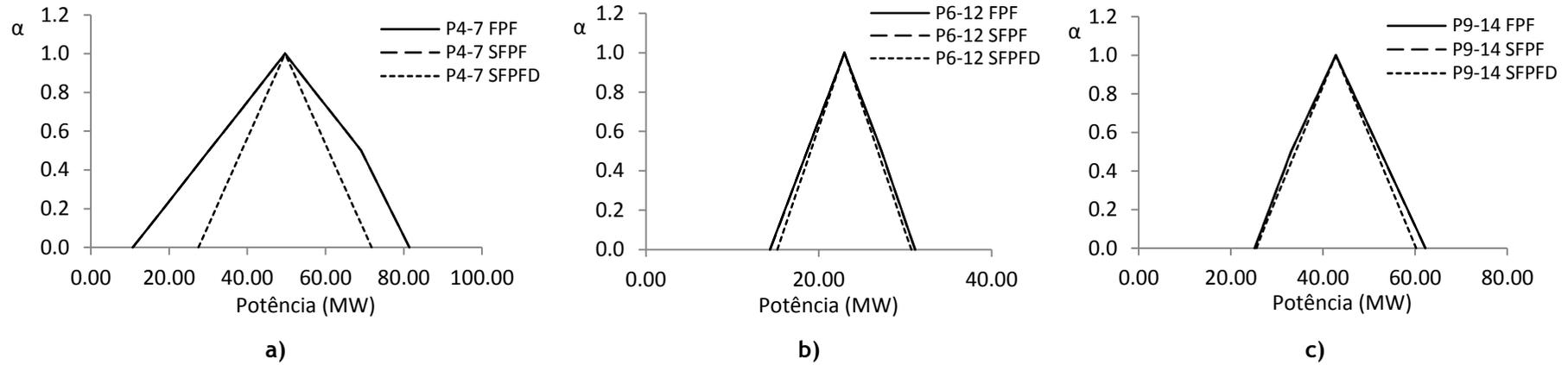


Figura B.3 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 4-7 (a), 6-12 (b) e 9-14 (c): rede de 14 barramentos IEEE, secção 5.4

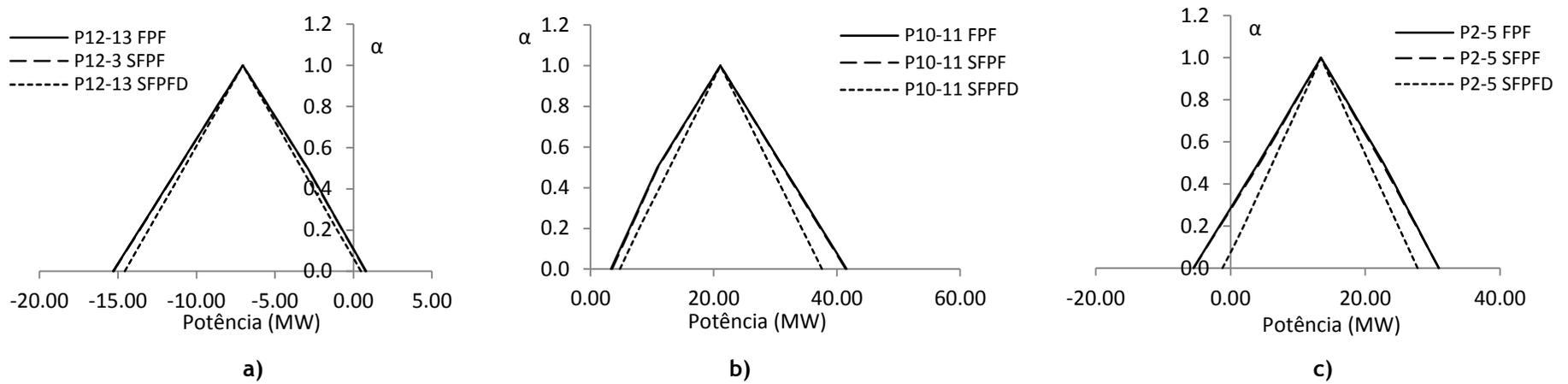


Figura B.4 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa nos ramos 12-13 (a), 10-11 (b) e 2-5 (c): rede de 14 barramentos IEEE, secção 5.

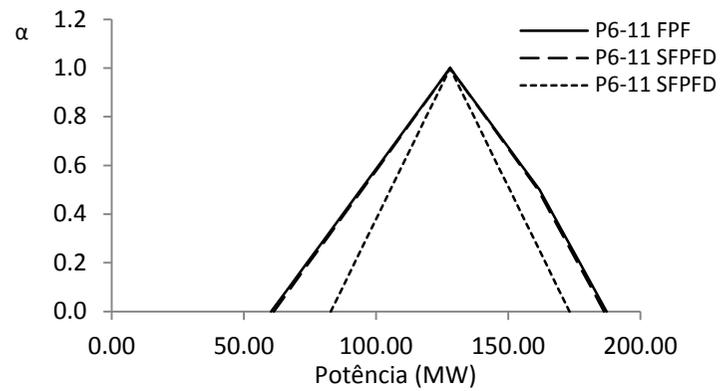


Figura B.5 - Distribuição de possibilidade para o trânsito de potência activa no ramo 6-11: rede de 14 barramentos IEEE, secção 5.4