

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Trânsitos de Energia em Redes Eléctricas com
Elevada Penetração de Produção Eólica**

Daniel António Magalhães Ribeiro

VERSÃO PROVISÓRIA

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

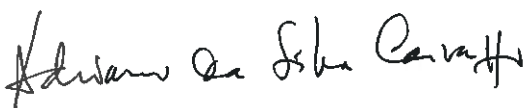
Orientador: Prof. Doutor Cláudio Domingos Martins Monteiro

Fevereiro de 2009

A Dissertação intitulada

**“TRÂNSITOS DE ENERGIA EM REDES ELÉCTRICAS COM ELEVADA PENETRAÇÃO
DE PRODUÇÃO EÓLICA”**

foi aprovada em provas realizadas em 25/Fevereiro/2009

o júri
71 presidente 
Professor Doutor Carlos Manuel de Araújo Sá
Professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Professor Doutor Jorge Correia Pereira
professor auxiliar da Faculdade de Economia da Universidade do Porto


Professor Doutor Claudio Domingos Martins Monteiro
professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados

Autor - Daniel António Magalhães Ribeiro



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

A crescente procura de energia eléctrica e as cada vez mais escassas reservas de recursos fósseis exercem uma pressão para o desenvolvimento e integração de novos tipos de produção de origem renovável, que visam sustentar o crescimento energético e diminuir a dependência do petróleo. O aparecimento destas de novas formas de produção, paralelamente com a liberalização do mercado, provoca novos desafios na exploração e planeamento dos sistemas eléctricos pois, as novas formas de planeamento e gestão dos sistemas integram uma grande componente de incertezas que deve ser modelada ao nível da própria informação e ao nível dos modelos de análise de sistemas eléctricos usados na gestão e planeamento.

A presente dissertação apresenta um estudo de modelações e propagação de incerteza tendo como base a Rede de Transporte Nacional reduzida, onde são aplicadas as metodologias desenvolvidas. Estas metodologias permitem modelar a incerteza associada à produção e consumo de energia eléctrica e são realizadas estudando as inter-dependências existentes entre barramentos.

Para se proceder à propagação da incerteza implementou-se, de uma forma original, um trânsito de potências difuso onde as modelações das inter-dependências entre barramentos são incluídas como restrições. Os resultados obtidos demonstram que a largura dos números difusos obtidos como resultado do trânsito de potência difuso, diminuem à medida que se aumenta o número de dependências incluídas no modelo.

Palavras-Chave

Modelações de Incerteza; Números difusos; Trânsitos de potências; Trânsito de potências difuso.

Abstract

The growing demand for electricity and increasingly scarce reserves of fossil fuels pressure the development and integration of new types of production from renewable sources, which aim to sustain growth and reduce energy dependence on oil. The introduction of these new forms of production, in parallel with the liberalization of the electricity market, are causing new challenges in the operation and planning of electrical systems because the new forms of planning and management of systems incorporate a large amount of uncertainty which should be modelled at the information level itself and at the level of analysis models of electrical systems used in management and planning.

This dissertation presents a study of modelling and propagation of uncertainty based on the reduced network of the national electrical transmission system, in which the methodologies developed are applied. These methodologies allow modelling the uncertainty associated with the production and consumption of electricity and are achieved by studying the inter-dependencies between network buses.

To achieve the propagation of uncertainty, a fuzzy power flow is introduced, in an original way, where inter-dependencies between buses are included as constraints. The results show that the width of the fuzzy numbers obtained, as a result of fuzzy power flow, decreases with the increase of the number of dependencies included in the model.

Keywords:

Uncertainty Modelling; Fuzzy numbers; Power flow; Fuzzy Power Flow.

Agradecimentos

Quero agradecer a todos os que, directamente ou indirectamente, contribuíram para a elaboração desta dissertação.

Ao Professor Cláudio Monteiro, pelo seu apoio, orientação e conselhos prestados que contribuíram positivamente para o desenrolar deste trabalho.

Ao Engenheiro Rui Azevedo e Engenheiro João Sousa pela sua amizade e apoio deram na revisão do presente documento.

A todos que frequentaram a J204 agradeço a troca de ideias e o ambiente criado, propício ao desenvolvimento deste tipo de trabalho.

A todos os meus amigos e colegas agradeço o apoio, palavras de incentivo e força que me deram ao longo destes meses.

À Liliana agradeço todo o apoio, carinho, paciência e boa disposição que me concedeu durante a elaboração desta dissertação.

E porque os últimos são sempre os primeiros, quero agradecer aos meus pais por, para além de me sustentarem, me terem dado sempre bons conselhos, apoio e por estarem sempre presentes ao longo da minha vida.

Daniel António Magalhães Ribeiro

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xiii
Abreviaturas e Símbolos	xiv
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Motivação	1
1.2 - Objectivos.....	2
1.3 - Estrutura da Dissertação.....	3
Capítulo 2	3
Estado da Arte	3
2.1 - Trânsitos de Potência	3
2.1.1 - Trânsitos de Potência Determinísticos	4
2.1.2 - Trânsito de Potência Probabilístico	5
2.1.3 - Trânsitos de Potência Difuso	5
2.1.4 - Diferenças dos Modelos.....	6
2.2 - Relação entre variáveis.....	7
Capítulo 3	9
Definição dos casos de estudo	9
3.1 - Rede Nacional Transporte Reduzida.....	9
3.1.1 - Geradores Convencionais	12
3.1.2 - Geradores Eólicos	13

3.1.3 - Cargas	13
3.2 - Produção Convencional	14
3.3 - Produção Eólica	14
3.3.1 - Distribuição Uniforme da Potência Gerada	15
3.3.2 - Distribuição da Potência em Função da Distância.....	15
3.4 - Consumo	18
3.5 - Importação/Exportação	19
Capítulo 4	21
Modelação da Incerteza com Uma Abordagem de Números Difusos	21
4.1 - Modelação Linear	21
4.1.1 - Exemplos ilustrativos	23
4.1.1.1 - Modelação de Produções	23
4.1.1.2 - Modelação das Cargas.....	27
4.2 - Modelação Quadrática	29
4.2.1 - Exemplo Ilustrativo	30
Capítulo 5	33
Trânsito de Potências Difusos	33
5.1 - Trânsito de Potência Determinístico	33
5.1.1 - Validação Trânsito de Potências Determinístico.....	35
5.2 - Implementação do Modelo Difuso.....	36
Capítulo 6	41
Desempenho dos Modelos	41
6.1 - Trânsitos Determinísticos	41
6.2 - Resultados do Trânsito de Potências Difuso	43
6.2.1 - Sem Modelação de Incerteza.....	43
6.2.2 - Inclusão da Modelação de uma Produção	44
6.2.3 - Inclusão da Modelação Linear das Cargas.....	45
6.2.4 - Inclusão da Modelação Quadrática das Cargas	46
Capítulo 7	49
Conclusões e Trabalhos Futuros.....	49
Referências	51

Lista de figuras

Figura 3.1- Rede interligada de teste [33].	10
Figura 3.2 - Curva de potência.	16
Figura 3.3 - Coeficientes de correlação de séries de velocidade de vento em função da distância.	16
Figura 3.4 - Fluxograma explicativo do algoritmo que efectua o cálculo de séries de velocidade de vento.	17
Figura 4.1 - Produção no Barramento N.º19 Vs Produção no Barramento N.º10.	22
Figura 4.2 - Fluxograma da metodologia seguida na parametrização linear.	22
Figura 4.3 – Produção barramento N.º19 Vs produção no barramento N.º10.	24
Figura 4.4 - Soluções possíveis face a soluções reais.	24
Figura 4.5 - Parametrização da recta de probabilidade 50%.	25
Figura 4.6 - Parametrização da recta que identifica quais os valores, superiores ou inferiores, a 25% dos casos.	25
Figura 4.7 - Parametrização da recta que indica quais os valores superiores ou inferiores, a 75% dos casos.	26
Figura 4.8 - Parametrização obtida.	26
Figura 4.9 - Carga no barramento N.º10 em função do valor da carga no barramento N.º18.	27
Figura 4.10 – Parametrização da recta $Y_{0.5}$.	28
Figura 4.11 – Regressão para obtenção dos parâmetros da recta $Y_{0.25}$.	28
Figura 4.12 – Regressão para obtenção dos parâmetros da recta $Y_{0.75}$.	29
Figura 4.13 - Resultado da modelação linear do consumo.	29
Figura 4.14 - Consumo barramento N.º18 vs consumo barramento N.º10.	30
Figura 4.15 - Separação dos pontos fronteira.	31
Figura 4.16 - Resultados da regressão dos pontos fronteira por um polinómio de segundo grau.	31
Figura 5.1 - Fluxograma explicativo do funcionamento do algoritmo Newton-Raphson aplicado à resolução de trânsito de potências.	35
Figura 5.2 - RNT reduzida implementada no PowerWorld.	36
Figura 5.3 - Fluxograma explicativo do funcionamento do trânsito de potências difuso.	39
Figura 6.1 - Aproximação por um número difuso da potência gerada no barramento N.º18.	42
Figura 6.2 - Aproximação por um número difuso da potência consumida no barramento N.º18.	42
Figura 6.3 -Aproximação por um número difuso da potência activa na linha 13-20.	42
Figura 6.4 - Comparação dos valores reais versus o resultado obtido utilizando o trânsito de potências difuso.	44
Figura 6.5 - Resultado da modelação da dependência entre dois barramentos de produção.	44
Figura 6.6 - Resultado da modelação linear da dependência entre barramentos de consumo na	45

Figura 6.7 - Resultado da modelação linear da dependência entre barramentos de consumo na.....	46
Figura 6.8 - Resultado da modelação quadrática da dependência entre barramentos de consumo na linha 13-20.....	47
Figura 6.9 - Resultado da modelação quadrática da dependência entre barramentos de consumo na linha 15-16.....	47

Lista de tabelas

Tabela A.1 - Caracterização das linhas da rede de transporte.....	11
Tabela A.2 - Caracterização dos transformadores da rede de transporte.....	11
Tabela A.3 - Capacidade nominal das baterias de condensadores da rede de transporte.	12
Tabela A.4 - Capacidade e limites de produção por máquina dos geradores convencionais equivalentes.	13
Tabela A.5 - Potência dos geradores eólicos equivalentes.	13
Tabela A.8 - Valor máximo e mínimo de carga considerada. Um cenário para cada dia típico, de cada estação do ano.....	14
Tabela 3.1 - Valores do desvio padrão em função da distância.....	18
Tabela 5.1 - Dimensão das submatrizes do Jacobiano.	34

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

OMEL	Operador de Mercado Ibérico de Energia
REN	Redes Energéticas Nacionais, SGPS
RNT	Rede Nacional de Transporte

Lista de símbolos

DC	Corrente Contínua;
AC	Corrente Alternada;
P_c	Potência Consumida;
P_g	Potência Gerada;
P_i	Potência Injectada;
S_{ik}	Potência aparente numa linha do sistema eléctrico;
$P_{eg/barr}$	Potência eólica gerada em cada barramento;
P_{eg_global}	Potência total eólica gerada a nível nacional;
V_v	Velocidade de vento artificialmente criada;
i, j, k	Índices dos barramentos ou ramos de um sistema eléctrico;
μ	Média de uma variável;
σ	Desvio padrão;

PV	Barramento típico de geração onde existe a possibilidade de controlo de tensão com injeção de potência reactiva.
PQ	Barramento típico de consumo, onde não existe capacidade de controlo de tensão.
CR	Barramento de compensação e referência;
$\tilde{P}$ ou $\tilde{p}$	Representação de um número difuso;
α	Representa o corte de determinado nível de um número difuso.

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo enquadra-se o problema na nossa sociedade, e especificam-se os objectivos definidos para esta dissertação. Por fim, apresenta-se a estrutura do presente documento.

1.1 - Motivação

Assistimos actualmente a uma mudança de paradigma nos sistemas eléctricos de energia. Apesar da crescente capacidade de gestão de informação, capacidades de previsão e capacidades técnicas de engenharia nos sistemas de energia, das mudanças de paradigma estão a resultar maiores incertezas nas variáveis dos sistemas eléctricos e consequentemente maiores incertezas nas variáveis do trânsito de potências. Estas incertezas estão associadas a:

- Uma tendência de liberalização de mercado, implicando uma menor capacidade de controlo do mercado restante do envolvimento de múltiplos agentes de decisão em que não há troca de informação. Destas incertezas de mercado resultam incertezas no despacho que dependem ainda das volatilidades dos mercados dos recursos energéticos convencionais como o preço do petróleo, do gás e de emissões;

- Incertezas resultantes de uma maior integração de eólica e outras renováveis com características de intermitência de recursos;

- Incertezas resultantes de novos comportamentos e novas tecnologias de consumo.

Num paradigma de sistemas eléctricos com maiores incertezas será necessária a modelação destas incertezas e a adaptação de ferramentas de análise capazes de integrar estas modelações. As incertezas nas diversas variáveis não são independentes, existem dependências entre a produção eólica entre zonas próximas, ou a dependência entre consumos nos diversos nós da rede ou ainda as dependências entre produções resultantes de optimização de despacho. Estes aspectos motivam a modelação holística das incertezas, modelando a dependência entre variáveis e a modelação das incertezas nestas dependências.

Também são necessários trânsitos de potência capazes de integrar as incertezas e serem capazes de fazer a computação destas para que os resultados as reflectam podendo,

posteriormente, ser agregados de forma a compreender o funcionamento do sistema ao longo do tempo, isto é, capacidade de perceber, por exemplo, o estado de uma linha ao longo do tempo. Saber com que frequência essa linha se encontra, ou pode encontrar congestionada, saber em média qual a energia que circula na linha durante um determinado período de tempo. Saber estes valores, não deterministicamente, mas com a devida incerteza associada.

A ideia dos Trânsitos de Energia é uma metodologia que, com base numa grande fonte de informação proveniente das simulações de trânsitos de potências, consiga calcular e apresentar resultados concisos e objectivos mas que transmitam toda a informação relativa e discriminativa do estado do sistema.

1.2 - Objectivos

Este estudo pretende, com base na Rede Nacional de Transporte reduzida de Portugal, desenvolver um trânsito de potências que permita incorporar as incertezas associadas às variáveis de entrada, potência gerada e consumo nos diferentes nós da rede.

Para conseguir atingir esse objectivo foram definidas diferentes etapas:

- Construção de um modelo de trânsito de potências determinístico;
- Recolha de dados referentes ao consumo e produção nacional para o período de um ano posteriormente sincronizar na mesma base horária e adapta-los à rede reduzida utilizada para simular. Obtidos estes dados efectuar simulações de trânsitos de potência determinísticos e, para cada simulação, calcular as variáveis de saída, potência injectadas, trânsito nas linhas e perdas;
- Identificar possíveis dependências entre variáveis e, caso existam, proceder à modelação das mesmas;
- Estudar séries de velocidade de vento associadas de diferentes localizações de parques eólicos em Portugal continental e produzir um modelo capaz de, com base na série de vento de um determinado parque eólico, inferir uma série de vento para outro parque eólico com uma incerteza associada. As séries de vento podem ser utilizadas num modelo de previsão [1] onde a saída é uma previsão da potência gerada por cada parque eólico;
- Modelação difusa de todas as séries temporais recolhidas;
- Modelação probabilística de todas as séries temporais;
- Criar um modelo que, com base no trânsito de potências desenvolvido, permita incorporar as modelações da incerteza e as propague para se obter na saída do trânsito de potências o comportamento de todas as variáveis, ou seja, conseguir obter incertezas, distribuição dos valores, frequência, para os trânsitos de potência nas linhas, do valor das perdas e de todas as restantes grandezas envolvidas no cálculo de trânsitos de potência;
- Determinar, com os resultados dos modelos criados, valores para energia percorrida em determinada linha, a potência que em média percorre cada linha, determinar a frequência com que determinada linha atinge o seu limite transporte de potência, determinar outros valores que possam ter utilidade no planeamento e expansão da rede.

1.3 - Estrutura da Dissertação

O documento está estruturado sob a forma de sete capítulos. Sendo que os capítulos 1 e 2, apresentam conceitos de introdução teórica ao tema em questão com os quais se pretende fazer uma introdução do problema e descrever o estado da arte. Nos restantes capítulos, nomeadamente capítulo 3, 4, 5 e 6 descreve-se o trabalho realizado.

No capítulo 2 é apresentado o estado da arte relativamente a modelos existentes de trânsitos de potência e modelos de trânsitos de potência capazes de tratar incerteza. É abordado ainda a forma como se modela a incerteza associada às séries dos dados de entrada do trânsitos de potência. Por fim descreve-se como se modelam relações entre variáveis.

O capítulo 3 descreve a rede utilizada nas simulações e descreve os dados que foram recolhidos para utilizar na simulação. Aborda a forma como os dados foram tratados e sincronizados.

O capítulo 4 descreve a forma como os dados recolhidos foram analisados e modelados para se obter uma modelação difusa de cada série. É estudada a relação entre variáveis e apresentada a forma como se procedeu à modelação da correlação.

No capítulo 5 é apresentado o modelo de trânsito de potências difuso e uma forma original de implementação, explicando a capacidade de adicionar restrições e o modo como este incorpora a relação entre variáveis.

No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos com o modelo difuso, a evolução dos resultados ao longo das simulações e comparação com os valores reais considerados.

O capítulo 7 apresenta as conclusões finais deste trabalho, as metas que se conseguiram atingir e indica possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo é exposto um resumo da investigação efectuada no âmbito desta dissertação.

2.1 - Trânsitos de Potência

Na análise, estudo e simulação de sistemas de energia, uma das ferramentas fundamentais e imprescindíveis são os trânsitos de potência. Inicialmente foram desenvolvidos modelos determinísticos que permitiam simular o estado do sistema eléctrico com base na especificação dos valores das potências injectadas nos barramentos.

Esta análise, apesar de útil, tornou-se insuficiente por ser necessário prever o estado de funcionamento do sistema com a alteração do consumo e variação das produções. Para se poder simular todos os possíveis estados do sistema foram desenvolvidos os modelos probabilísticos, que permitiam integrar a incerteza associada às cargas e produções sob a forma de distribuição de probabilidades e, desta forma, simulam-se milhares de trânsitos de potência determinísticos para determinar os possíveis estados do sistema. No entanto, a simulação por distribuição de probabilidades necessita de um histórico dos valores, de produções e consumo, para se poder realizar uma modelação adequada. Em determinadas circunstâncias não se dispunha desses valores, por exemplo, no planeamento de sistemas eléctricos onde as futuras produções e consumos são uma previsão. Nestes estudos por vezes recorre-se a especialistas para determinar valores adequados a utilizar, e estes indicam um valor possível dentro de um determinado intervalo.

De modo a modelar a linguagem natural matematicamente e determinar todos os estados possíveis do sistema surgiram os modelos de trânsito de potência difusos.

Ambos os modelos, probabilístico e difuso, modelam a incerteza presente nos sistemas eléctricos. No entanto não se pode dizer que um dos modelos é melhor que outro, mas pode-se dizer que se complementam um ao outro.

2.1.1 - Trânsitos de Potência Determinísticos

Podem existir duas abordagens diferentes para a utilização de fluxos de potências determinísticos:

- modelo linearizado (DC), onde são assumidas simplificações;
- modelo corrente alternada (AC).

No modelo DC assume-se que as relações entre as potências activas injectadas nos barramentos do sistema são lineares. Assume-se ainda que a fase da tensão nos barramentos e os trânsitos de potência activa nas linhas também são lineares. Outra das simplificações admitidas é que a reactância possui sempre um valor muito maior que a resistência, e desse modo admite-se que a resistência é desprezável face ao valor da reactância. Este modelo tem a vantagem de ser computacionalmente pouco exigente e ser muito versátil, isto é, pode-se modificar o modelo para realizar diferentes estudos, por exemplo, o estudo do fluxo de potência óptimo.

Uma das grandes referências na área dos modelos AC, são os algoritmos baseados no método de Newton-Raphson, uma apresentação e comparação realizada em 1967, [2], demonstra que o método de Newton-Raphson convergia com um menor número de iterações do que o método de Gauss-Seidel, no entanto consumia mais recursos computacionais, escassos na época.

A evolução computacional demorou décadas e foram desenvolvidos outros modelos que, consecutivamente, tentavam melhorar a performance e qualidade dos resultados. Em 1974 apresenta uma descrição dos algoritmos disponíveis para a resolução do fluxo de potências [3].

A apresentação do modelo desacoplado do método de Newton-Raphson [4] em 1972, e mais importante, a apresentação do método de desacoplamento rápido, [5], em 1974, permitiram diminuir o tempo de cálculo e a necessidade de memória computacional, questões que perderam importância com o desenvolvimento da capacidade de processamento e memória disponibilizada.

Ao longo dos anos foram apresentadas novas soluções para este problema. Estuda-se a possibilidade de utilizar processamento paralelo e vectorial [6],[7] e [8].

Têm-se estudado a aplicação de algoritmos genéticos [9], evolucionários e algoritmos utilizando optimização por enxames de partículas. E recentemente demonstrou-se ser viável a aplicação de algoritmos utilizando optimização por enxame de partículas evolucionário [10], na resolução do problema de trânsito de potências.

Em 1967 existia o problema dos recursos computacionais exigidos pelo método de Newton-Raphson, no entanto, devido à evolução dos recursos disponíveis, este problema perdeu importância e este algoritmo é actualmente utilizado num elevado número de aplicações industriais pela sua robustez e rápida convergência.

2.1.2 - Trânsito de Potência Probabilístico

Os modelos probabilísticos têm vindo a ser desenvolvido desde meados dos anos 70, surgiram como necessidade de incorporar as incertezas associadas aos sistemas eléctricos. A forma tradicional de resolução destes problemas passa pela simulação de um elevado número de trânsitos de potência determinísticos, com base em sorteios, e posterior agregação probabilística dos resultados. Este tipo de sistema baseado em sorteios requer um elevado poder de cálculo computacional, pelo que foram desenvolvidos algoritmos [11],[12],[13], de base analítica para resolução deste problema.

Considerando o modelo determinístico DC foram desenvolvidos algoritmos que permitem integrar distribuições de probabilidade, discretas e contínuas, para as potências especificadas sendo as distribuições dos trânsitos potência obtidas através de um processo de convolução.

Em 1976 foi apresentado um modelo AC [14], e no ano seguinte apresentaram-se alguns desenvolvimentos [15], onde são obtidas as expressões linearizadas para diversas grandezas, tais como potência activa e reactiva produzida. Estas expressões são utilizadas para construir as distribuições de probabilidade das grandezas respectivas através de um processo de convolução.

Em 1981 foi apresentada uma metodologia que utiliza a transformada de Fourier [43] com o objectivo de diminuir o elevado tempo de cálculo computacional requerido pelas metodologias que utilizam o processo de convolução. Neste modelo as equações determinísticas da versão AC do problema de fluxo de potências são linearizadas em torno do ponto de funcionamento associado ao valor médio das distribuições das potências especificadas. Estas expressões são posteriormente utilizadas para construir as distribuições de probabilidade de diversas grandezas realizando a convolução, no domínio das frequências, das distribuições de probabilidade das potências especificadas. Em continuação do trabalho desenvolvido foram apresentados novos métodos, [16], [17], que permitem integrar saídas de serviço de linhas e melhorar a qualidade do modelo. Foram também desenvolvidas soluções, recorrendo a modelos probabilísticos, para simular o desequilíbrio entre as três fases do sistema eléctrico [18] e [19].

Em 2004 foi apresentado um novo método que permite acelerar o processo de simulações mantendo um elevado nível de precisão. Este método combina o conceito de “Cumulants” com a expansão de Gram-Charlier [20] utilizando o modelo DC do trânsito de potências.

2.1.3 - Trânsitos de Potência Difuso

A teoria dos conjuntos difusos foi apresentada em 1965 por L. A. Zadeh [21], este autor foi responsável pela apresentação e, ao longo da sua vida, contribuiu com vários desenvolvimentos desta teoria [22].

A teoria dos conjuntos difusos diferencia-se da teoria das probabilidades pela essência da informação, isto é, a teoria das probabilidades é utilizada quando se pode definir quantitativamente a informação que está a representar, enquanto os conjuntos difusos utilizam-se se a informação a representar apresenta um carácter qualitativo. Uma das grandes características que diferencia os conjuntos difusos é que permitem estabelecer uma

interface com a linguagem natural e, deste modo, permitem modelar matematicamente alguns conceitos que de outra forma não seria possível.

Por vezes podemos não saber a função densidade de probabilidade da carga de determinado barramento, no entanto, podemos ter uma noção do valor que a carga pode assumir. Matematicamente não se consegue modelar este conceito recorrendo à teoria das probabilidades. Utilizando a teoria dos conjuntos difusos consegue-se definir matematicamente este conceito, o que pode ser extremamente útil quando não se conhecem valores para construir uma função densidade de probabilidade, ou quando se pretende incorporar em determinados estudos a opinião de especialistas.

Recorrendo aos conjuntos difusos foram desenvolvidos métodos que permitem integrar a incerteza associada aos sistemas eléctrico. Em 1989 foi apresentado o primeiro trânsito de potências difuso DC [23], posteriormente em 1990 J. T. Saraiva, V. Miranda e M. A. Matos [24], apresentavam o primeiro algoritmo de fluxo de potências AC recorrendo aos números difusos. Este método baseia-se no resultado do trânsito de potência determinístico do valor central do intervalo difuso de entrada e, partindo dessa solução central, calcula os desvios utilizando a expansão de Taylor de primeira ordem das equações de trânsito de potência nas linhas, seja trânsito de potência activa ou reactiva.

Esta formulação de trânsito de potências difuso inclui o barramento de compensação e referência, esta inclusão traz como consequência que para além da sua função usual no trânsito de potência determinístico, este barramento acumula as variações de incerteza dos restantes barramentos. Um algoritmo correctivo foi introduzido [25] para reduzir o impacto deste problema.

Em 2005 surge um novo modelo, de trânsito de potências difuso DC [26], que permite eliminar o problema do barramento de compensação e referência recorrendo a um método iterativo para resolver o problema. Posteriormente e, usando um procedimento semelhante, foi desenvolvido um transito de potência difuso AC simétrico onde não se verifica qualquer influência do barramento de compensação e referência.

No artigo apresentado em 2007 [27], é realizada uma comparação entre os primeiros métodos desenvolvidos e o método simétrico, onde não se verifica a influência do barramento de referência. Pode-se concluir que os métodos inicialmente desenvolvidos acumulam um excesso de incerteza no barramento de compensação e referência. Foi publicado outro artigo, [28], onde são apresentados alguns resultados e aplicações desta metodologia.

2.1.4 - Diferenças dos Modelos

Estas duas abordagens que permitem simular os estados possíveis do sistema eléctrico produzem resultados diferentes, ou seja, como a abordagem probabilística consiste em efectuar milhares de simulações de transítos de potência determinísticos, os resultados podem ser tratados probabilisticamente e consegue-se saber a frequência com que determinado estado do sistema acontece.

A abordagem difusa não permite fazer uma análise probabilística dos resultados e não se possui a frequência que determinado estado do sistema pode acontecer. No entanto, o

trânsito de potências difuso tem a vantagem de mostrar todos os estados possíveis dos sistemas avaliados sob a forma de número difuso.

Pode-se concluir que uma abordagem não substitui a outra, mas que as duas se complementam. Desta forma, e sempre que possível, deve-se utilizar as duas abordagens e realizar uma integração dos resultados dos dois modelos.

2.2 - Relação entre variáveis

Uma das formas de modelar incerteza nos sistemas eléctricos de energia é estudar a relação das potências geradas, consumidas ou injectada em cada barramento.

Nos modelos de trânsito de potências probabilístico a integração das dependências estatísticas das distribuições de probabilidade das potências especificadas em determinados barramento teve o início do estudo em 1977 [29], onde se admitia uma dependência linear. Posteriores desenvolvimentos foram apresentados em 1984 [30], e aplicação desde desenvolvimento foram apresentadas de forma integrada no método de trânsito de potências probabilístico [17].

Os modelos iniciais de trânsito de potências difuso não consideram a hipótese de especificar algum tipo de correlação entre funções difusas. Surgiu em 1996 a primeira tentativa de incorporar correlações nos modelos difusos de trânsito de potência DC [31]. O método desenvolvido apenas admitia total correlação entre potências activas e utilizando o modelo DC.

Posteriormente em 2004 foi apresentado um modelo [32] que, funciona em conjunto com o trânsito de potências difuso AC, e permite correlacionar valores entre potências activas, reactivas e entre potências activas e reactivas.

Capítulo 3

Definição dos casos de estudo

Para estabelecer uma base real de aplicação das metodologias desenvolvidas tentou-se, sempre que possível, utilizar dados reais do funcionamento da RNT. No entanto necessitou-se de sincronizar e adaptar os dados à rede de teste, neste capítulo são explicadas as metodologias seguidas e descrita a rede utilizada.

3.1 - Rede Nacional Transporte Reduzida

Os dados da rede utilizada foram fornecidos pela Professora Doutora Maria Helena Vasconcelos que utilizou, esta mesma rede, na realização da sua dissertação de doutoramento [33].

A rede utilizada é um sistema simplificado, da rede de transporte portuguesa relativa ao período 2002-2007 (de acordo com o Plano de Investimentos da Rede Nacional de Transporte 2002-2007), resultando num sistema eléctrico com três níveis de tensões, associado a um esquema de cores (Figura 3.1). Em azul estão representas linhas e barramentos de 150kV, a cor verde representa 220kV e a cor vermelha representa 400kV.

O sistema eléctrico contém:

- 24 barramentos, de entre os quais, 11 abastecem a rede de distribuição, sendo os consumos modelados como uma carga equivalente;

- 9 barramentos dispõem de baterias de condensadores, possíveis de visualizar a sua disposição na rede através da **tabela**;

- 28 linhas de transmissão, existindo a hipótese de cada uma corresponder ao equivalente de linhas em paralelo;

- 7 transformadores, existindo a hipótese de cada um corresponder ao equivalente de transformadores em paralelo;

- 14 geradores convencionais equivalentes, 3 são do tipo térmico clássico, 2 do tipo térmico de turbina a gás e 9 do tipo hídrico;

- 10 geradores eólicos equivalentes;

-O barramento 1 representa o equivalente da rede eléctrica Espanhola, no entanto apenas se utilizou este barramento associado aos valores de importação/exportação Portuguesa.

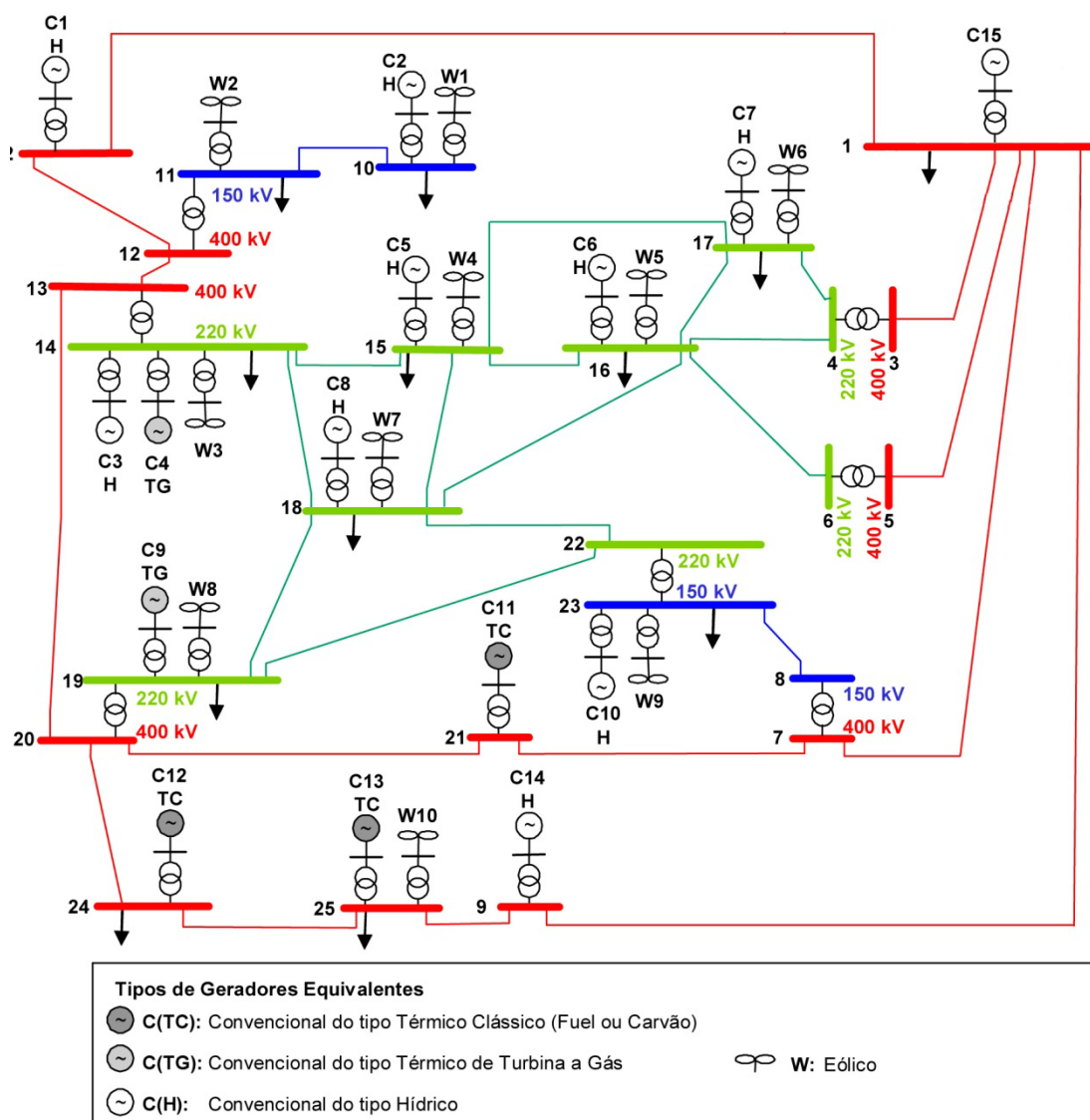


Figura 3.1- Rede interligada de teste [33].

Na Tabela 3.1 apresentam-se os dados utilizados para caracterizar as linhas da rede de transporte, com a seguinte legenda:

- $R + jX$ (Ohm): Impedância série do modelo em π ;

- $Y_{sh}/2$ (mS): Valor de cada admitância shunt do modelo em π ;

- I_z (Verão) e I_z (Inverno) (A): Valor máximo admissível em regime permanente para a corrente que atravessa a linha durante cenários de Verão e de Inverno, respectivamente.

Os dados que caracterizam os transformadores da rede de transporte encontram-se na Tabela 3.2, com a seguinte legenda:

- Un_i / Un_k (kV/kV): Valor nominal da razão de transformação;

- S_n (MVA): Potência aparente nominal;

- x_f (%): reactância de fugas (na base da máquina).

Considerou-se que todos os transformadores estão com a posição da tomada de regulação correspondente ao valor nominal da sua razão de transformação. Na Tabela 3.3 encontram-se os dados relativos à capacidade nominal (Q_n) das baterias de condensadores da rede de transporte. Não foi considerada a capacidade de ligar ou desligar parcialmente as baterias de condensadores, assumiu-se que estas se encontravam sempre em serviço.

Tabela 3.1 - Caracterização das linhas da rede de transporte.

Linha	Barramento i	Barramento k	Un [kV]	R [Ohm]	X [Ohm]	$Y_{sh}/2$ [mS]	I_z (Verão) [A]	I_z (Inverno) [A]
1	1	2	400	1.440	17.360	0	2991	3828
2	1	3	400	0.324	2.306	0	755	906
3	1	5	400	1.278	8.095	0	385	462
4	1	7	400	2.640	30.688	0	1160	1497
5	1	9	400	7.344	45.680	0	1495	1914
6	2	12	400	0.88	9.956	0.01	2991	3828
7	10	11	150	1.676	5.224	0.0052	1601	2338
8	12	13	400	0.42	5.122	0.0051	3816	4999
9	14	15	220	0.624	4.298	0.0043	5941	8140
10	15	16	220	1.334	10.878	0.0109	2x525	2x777
11	15	17	220	8.518	46.948	0.0469	470	695
12	17	16	220	2.998	16.623	0.0166	1050	1554
13	17	4	220	2.178	12.197	0.0122	1060	1272
14	16	4	220	3.049	17.037	0.017	688	825
15	16	6	220	2.323	12.971	0.013	701	841
16	14	18	220	2.807	32.718	0.0327	606	776
17	15	18	220	9.390	49.949	0.0499	604	893
18	16	18	220	6.437	35.526	0.0355	987	1460
19	18	19	220	4.461	24.348	0.0243	1102	1631
20	18	22	220	2.807	15.391	0.0154	1407	1800
21	22	19	220	4.106	25.552	0.0256	1407	1800
22	23	8	150	6.728	23.378	0.0234	654	949
23	13	20	400	3.623	41.143	0.0411	3320	4282
24	20	21	400	2.400	26.880	0.0269	1166	1411
25	21	7	400	2.080	22.400	0.0224	1657	2138
26	20	24	400	1.215	13.047	0.013	3470	4337
27	24	25	400	1.355	14.776	0.0148	3620	4561
28	25	9	400	5.011	52.045	0.052	1495	1914

Tabela 3.2 - Caracterização dos transformadores da rede de transporte.

Transformador	Barramento i	Barramento k	Un_i / Un_k [kV]	S_n [MVA]	x_f [%]
1	3	4	400/220	896	10%
2	5	6	400/220	448	10%
3	7	8	400/150	250	16.06%
4	12	11	400/150	720	11.70%
5	13	14	400/220	900	11.70%
6	22	23	220/150	300	5.89%
7	20	19	400/220	1500	12.47%

Tabela 3.3 - Capacidade nominal das baterias de condensadores da rede de transporte.

Bateria	Barramento	Qn[Mvar]
1	1	300
2	10	30
3	11	60
4	14	350
5	15	20
6	18	350
7	19	800
8	23	30
9	24	113
10	25	234

3.1.1 - Geradores Convencionais

Estão indicadas na Tabela 3.4 os valores que se adoptaram para a capacidade nominal e limites de produção por máquina dos geradores convencionais equivalentes, tendo a seguinte legenda:

- N.^o de máquinas: número de máquinas instaladas em cada gerador convencional equivalente;

-Tipo: Tipo de aproveitamento, para se conseguir fazer uma distinção entre, uma máquina hídrica de albufeira (HA), hídrica de fio-de-água (HF), térmica de turbina a gás (TG) e térmica clássica de fuel ou carvão (TC);

-Un (kV): Tensão nominal da máquina;

-Sn (MVA): Potência aparente nominal por máquina instalada no gerador equivalente;

-Pmin e Pmax (MW): limites, mínimo e máximo, da produção de potência activa em regime permanente, por máquina instalada no gerador equivalente;

-Qmin e Qmax (Mvar): limites, mínimo e máximo, de produção de potência reactiva, por máquina instalada no gerador equivalente;

-Pmax disp (Mw): potência máxima disponível por gerador convencional equivalente.

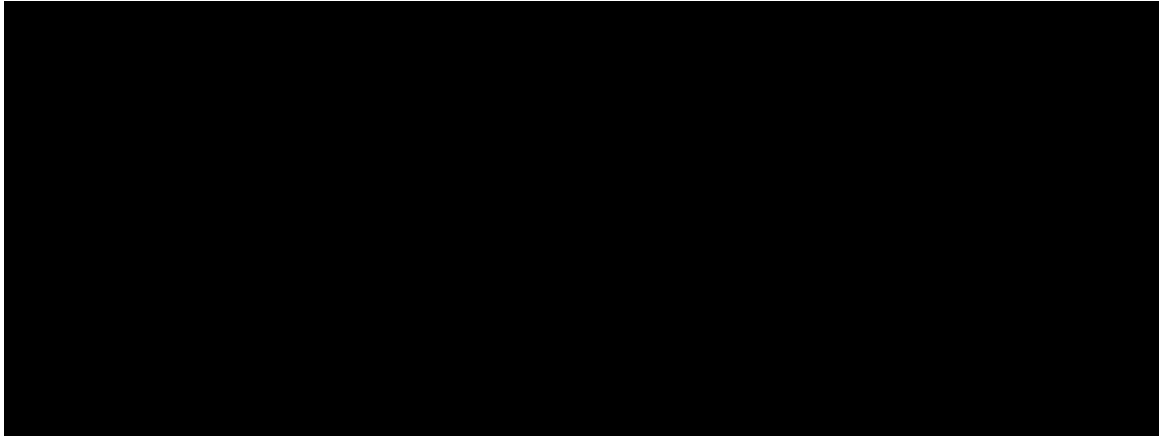


Tabela 3.4 - Capacidade e limites de produção por máquina dos geradores convencionais equivalentes.

3.1.2 - Geradores Eólicos

Na Tabela 3.5 apresentam-se os valores, considerados, que caracterizam a potência instalada de geradores eólicos equivalentes.

Tabela 3.5 - Potência dos geradores eólicos equivalentes.

Gerador	Potência (MW)
W1	290
W2	290
W3	180
W4	425
W5	90
W6	120
W7	1305
W8	590
W9	240
W10	220

3.1.3 - Cargas

Na Tabela 3.6 encontram-se descritos os valores de máximo e mínimo de carga admitidos, para cada dia típico, existindo um dia típico para cada estação do ano.

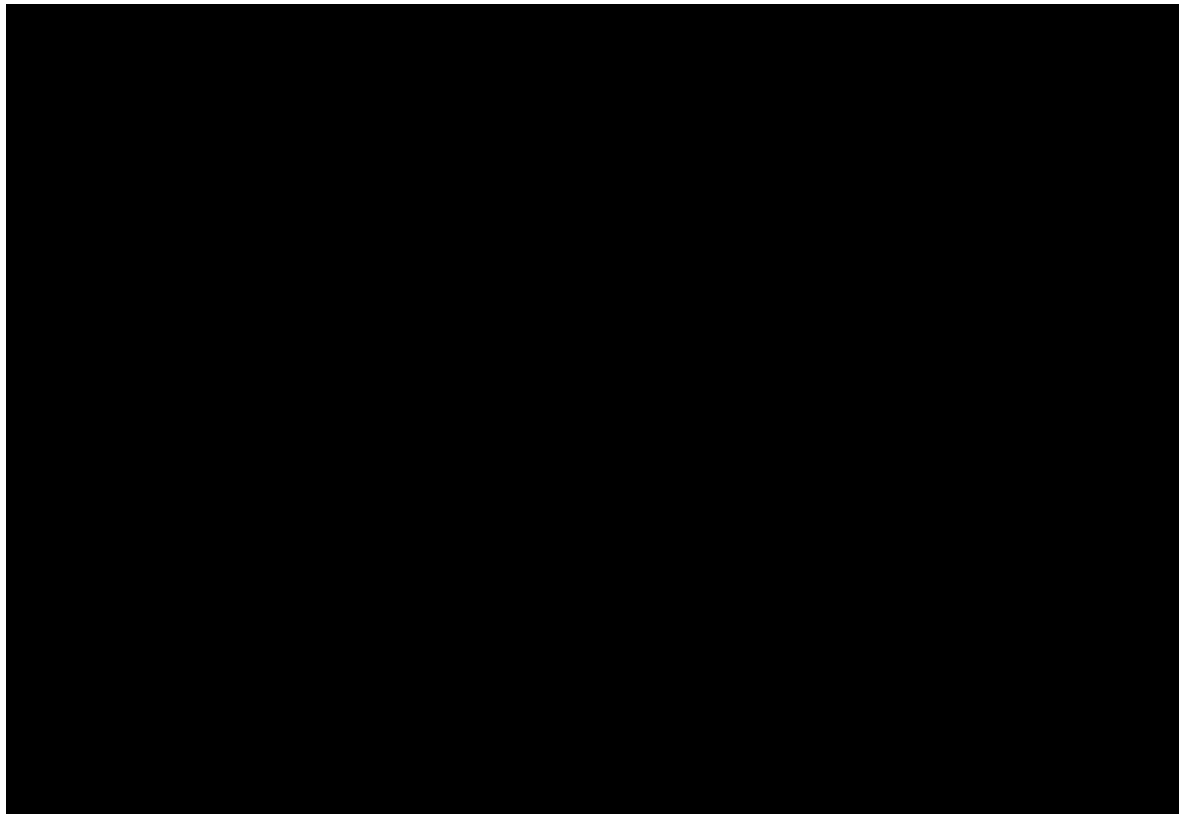


Tabela 3.6 - Valor máximo e mínimo de carga considerada. Um cenário para cada dia típico, de cada estação do ano.

3.2 - Produção Convencional

Por produção convencional entende-se produção de centrais com uma potência instalada na casa das centenas de MW. A produção destas centrais em Portugal é de origem de grandes hídricas (albufeiras ou a fio-de-água), ou térmicas, podendo, neste caso, o combustível primário ser carvão, diesel ou gás natural.

Os valores destas produções foram obtidos através do Operador de Mercado Ibérico de Energia (OMEL), as produções obtidas são horárias [34]. A maior dificuldade na aquisição dos valores de produção relaciona-se com a selecção das centrais portuguesas de todo o conjunto de dados. Utilizando a lista de centrais disponibilizada pela OMEL [35], é possível fazer uma selecção das centrais que estão localizadas em Portugal.

3.3 - Produção Eólica

Os dados utilizados para modelar a produção eólica foram recolhidos no endereço da internet da REN [36]. Os valores recolhidos são para a produção nacional com uma periodicidade de 15 minutos, no entanto os valores utilizados são horários, porque os valores recolhidos da produção convencional têm essa periodicidade.

3.3.1 - Distribuição Uniforme da Potência Gerada

De modo a obter a potência eólica gerada por cada barramento foi necessário fazer uma divisão dos dados de produção de modo à produção ser distribuída por cada nó onde existe geração. A divisão foi realizada dividindo o valor total de produção nacional pela potência instalada em cada barramento (3.1).

$$P_{eg/barr,m} = (P_{eg_global,m} \times P_{ins_total}) / P_{ins} \quad (3.1)$$

Segundo a equação (3.1) poderia concluir-se que uma variação de produção em um dos barramentos é acompanhada na mesma proporção por todos os restantes barramentos, o que não é verdadeiro pois a variação da produção não é linear.

A intensidade do vento pode aumentar em determinado local e, simultaneamente, noutra local manter-se ou diminuir, no entanto podem existir relações de velocidade vento ao entre duas zonas distintas.

3.3.2 - Distribuição da Potência em Função da Distância

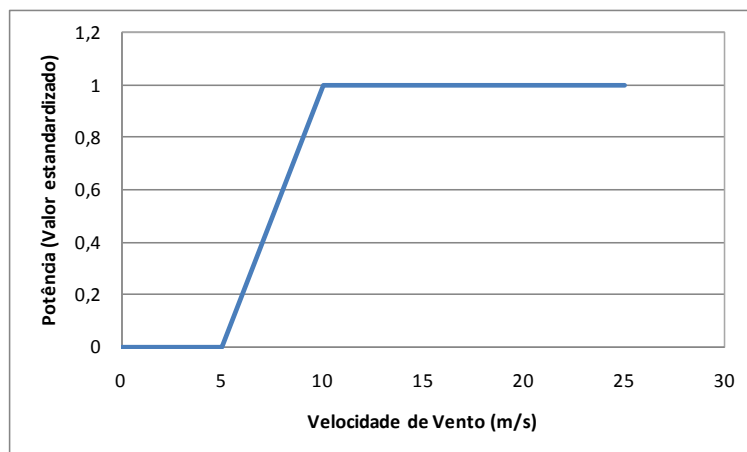
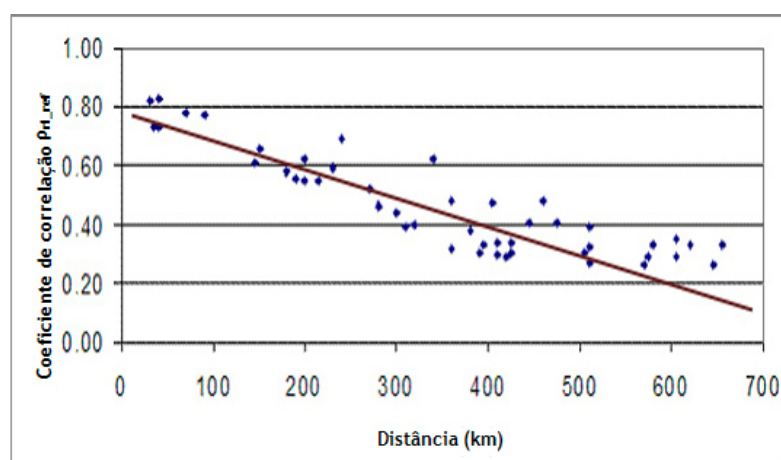
Pretendia-se nesta dissertação, inicialmente, estabelecer uma metodologia que modelasse correlações do vento em função da distância, isto é, sabendo a velocidade de vento para determinado parque eólico ter a capacidade de inferir velocidade de vento para outros parques eólicos e criar assim novas séries de velocidade de vento. Posteriormente utilizar-se-ia um sistema de previsão [1] para obter valores de potência produzida, com a devida incerteza associada.

No entanto devido à falta de dados de velocidade de vento e, ou, previsões de velocidade de vento não foi possível realizar este estudo.

Não abandonando a ideia inicial, utilizou-se por analogia um estudo realizado de correlações de velocidade de vento [37]. Para os cálculos descritos de seguida foi realizada uma standardização, entre [0, 1], da série de produção de potência eólica.

A técnica utilizada para realizar uma melhor distribuição dos valores de produção eólica consistiu em converter o conjunto de valores da produção eólica total, a nível nacional, em valores de velocidade de vento, P_{eg_global} , através de uma curva de potência típica, figura 3.2. Esta série de velocidade de vento foi atribuída a um ponto central no território nacional que no caso da rede utilizada corresponde ao barramento N.º18. Na Tabela 3.7 pode-se visualizar a distância de todos os barramentos ao barramento N.º18.

Efectuou-se um levantamento da distância, em km, de todos os barramentos, onde existe produção eólica, relativamente ao barramento N.º18.

**Figura 3.2** - Curva de potência.**Figura 3.3** - Coeficientes de correlação de séries de velocidade de vento em função da distância.

Sabendo os coeficientes de correlação, de duas séries de velocidade de vento, em função da distância, Figura 3.3, e tendo uma série de velocidades de vento para o ponto central no território nacional, fez-se uma modelação de modo a obter novas séries de velocidade de vento.

Pode-se visualizar, na Figura 3.4, o algoritmo implementado para efectuar o cálculo da nova série de velocidade de vento.

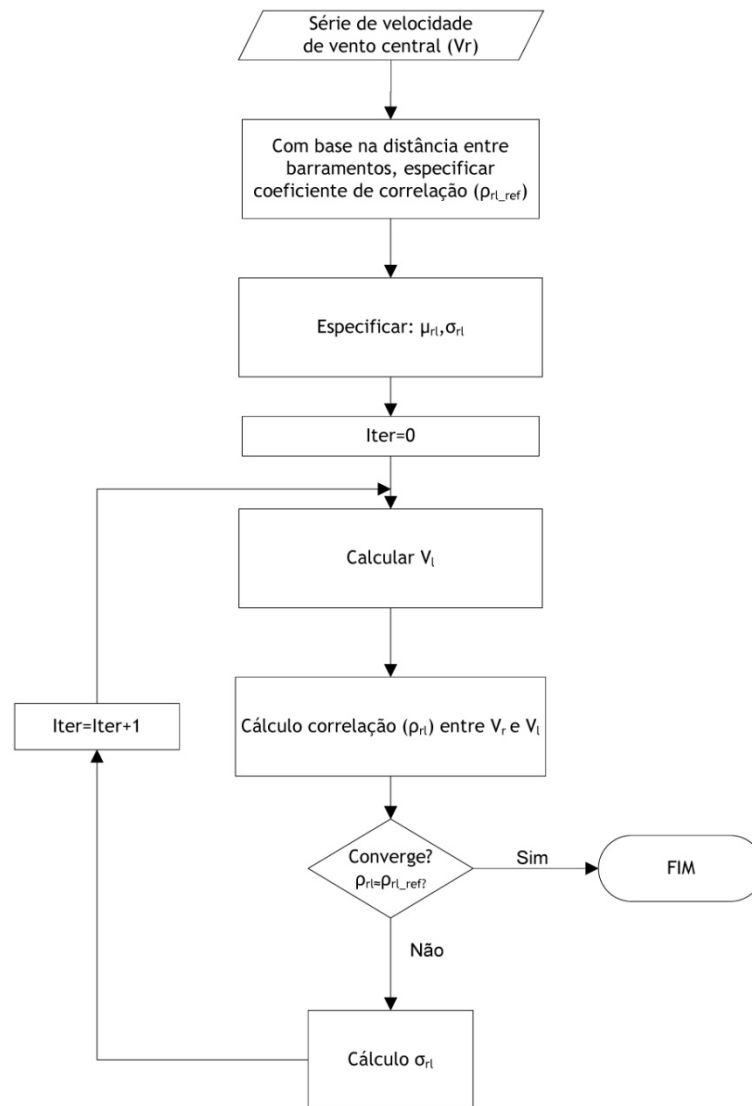


Figura 3.4 - Fluxograma explicativo do algoritmo que efectua o cálculo de séries de velocidade de vento.

Calcula-se a média (μ_r) da série central de velocidade de vento (V_r) e especifica-se um desvio padrão inicial (σ_r). A série V_r é a série de referência localizada num ponto central da zona de estudo.

É também especificado qual o coeficiente de correlação que se pretende atingir, ou seja, sabendo a distância em quilómetros que separa os dois parques eólicos e, sabendo ainda os valores dos coeficientes de correlação em função da distância, Figura 3.3, consegue-se especificar qual o valor de desvio padrão que as duas séries devem possuir para conseguir simular o coeficiente de correlação correspondente à distância existente entre os dois parques.

A nova série de velocidade de vento, V_I , é calculada pela equação (3.2) onde $\text{inv_norm}(x_{rI}, \mu_{rI}, \sigma_{rI})$ é a função que devolve o inverso da distribuição cumulativa normal. x_{rI} é um número aleatório gerado, μ_{rI} é a média do ruído adicionado, que neste caso se assumiu ser nula e σ_{rI} é o desvio padrão da série de velocidade de vento criada a cada iteração do algoritmo. Modificando σ_{rI} a cada iteração vão-se criando diferentes séries de velocidades de

vento até se atingir um coeficiente de correlação entre a série de velocidades de vento criada e a série original aproximadamente igual aos demonstrados na Figura 3.3. Na Tabela 3.7 encontra-se os valores do desvio padrão obtido que relacionam o parque instalado no respectivo barramento com o parque instalado no barramento N.º18.

Tabela 3.7 - Valores do desvio padrão em função da distância.

Barramento	σ_{rl}	km
Nº18	0,100	0
Nº 23	0,110	70
Nº19	0,120	105
Nº14	0,125	110
Nº15	0,130	120
Nº 11	0,135	137
Nº16	0,140	155
Nº 10	0,147	165
Nº17	0,165	220
Nº25	0,175	250

$$V_l = V_r + inv_norm(x, \mu_{rl}, \sigma_{rl}) \quad -\infty < x < +\infty \quad (3.2)$$

O cálculo do coeficiente de correlação é realizado segundo a seguinte equação:

$$\rho_{rl} = \frac{\mu(rl) - \mu(r)\mu(l)}{\sqrt{\sigma^2(r)\sigma^2(l)}} \quad (3.3)$$

Por último verifica-se a convergência, se o valor da correlação é aproximadamente igual ao valor especificado, termina o processo iterativo. Se não for semelhante é calculado um novo valor de desvio padrão, tornando a repetir-se o processo.

Obtidas as séries artificiais de valores de velocidade vento, calcula-se a potência produzida, utilizando a função curva de potência, figura 3.2, obtendo-se assim uma potência normalizada. Utilizou-se a potência instalada em cada barramento para, partindo da potência normalizada, obter a potência gerada em cada barramento.

3.4 - Consumo

Os valores de consumo nacional foram recolhidos no centro de informação da REN [36]. Estes valores referem-se à carga total nacional, no entanto, para a utilização do trânsito de potência necessita-se da carga dividida pelos nós onde existe consumo. Desse modo foram utilizados os valores dos dias típicos que a REN indica em [38]. Neste documento é fornecido o valor máximo e mínimo de consumo de potência activa e reactiva por subestação, para 4 dias típicos, um dia para cada estação do ano.

Como se utiliza um esquema da RNT reduzida, é necessário, para cada barramento, agrupar geograficamente a carga segundo as subestações correspondentes. Para efectuar esta tarefa localizou-se geograficamente as subestações, utilizando ferramentas geográficas e

recorrendo ao mapa georreferenciado da RNT disponível no site da REN [39]. De salientar que os valores obtidos são muitos semelhantes à distribuição feita pela Professora Doutora Maria Helena Vasconcelos [33].

O resultado obtido foi um intervalo com o mínimo e máximo de potência activa e reactiva para cada nó da rede utilizada. Para fazer a distribuição de carga optou-se por utilizar o valor médio do intervalo, desse modo consegue-se dividir o valor total da carga por cada nó.

Como resultado do modo como foi dividida a carga pelos nós fica implícito, nos dados de cada barramento, que se a carga cresce ou diminui em determinado barramento o mesmo acontece nos restantes barramentos. A afirmação anterior não é verdadeira porque a carga, em diferentes nós, não tem uma relação linear ao longo do tempo. De modo a modelar um comportamento próximo do real, para a distribuição das cargas em cada barramento, introduziu-se uma incerteza, admitindo-se uma variação de 10% sobre o valor anteriormente obtido.

A incerteza foi introduzida em cada barramento, somando, ao valor já obtido, o inverso da distribuição cumulativa normal.

A função utilizada (3.4), gera um número aleatório com média nula e um desvio padrão que é cerca de 10% do valor de P_{c_ref} obtido anteriormente.

$$P_{c_l} = P_{c_ref} + \text{inv_norm}(x, \mu_{rl}, \sigma_{rl}) \quad -\infty < x < +\infty \quad (3.4)$$

3.5 - Importação/Exportação

Os valores de importação foram obtidos no centro de informação da REN [36] nas estatísticas diárias, sendo que os valores recolhidos têm uma frequência de 15 minutos. No entanto utilizaram-se os valores com uma frequência horária porque esta é a periodicidade dos valores de produção convencional.

Os valores de importação/exportação foram modelados como um gerador no barramento N.º1, sendo que este barramento representa a Rede de Transporte Espanhola reduzida. Para simplificação do conjunto de dados utilizados, eliminou-se o consumo e geração espanhola, ficando o barramento N.º1 apenas a, produzir a importação portuguesa ou, a consumir a exportação portuguesa.

Capítulo 4

Modelação da Incerteza com Uma Abordagem de Números Difusos

As modelações apresentadas, neste capítulo, foram pensadas para futura utilização num trânsito de potências difuso.

Sabe-se que existem inter-dependências entre as diversas variáveis envolvidas no problema de simulação e operação dos sistemas eléctricos. Na geração de energia eléctrica, existem variáveis que são independentes, a energia eólica é o melhor exemplo desta situação como variável independente do consumo e como variável não despachável

No entanto, existem dependências em parques eólicos geograficamente próximos, a intensidade do vento não é independente para parques na mesma região. Da mesma forma a energia solar utilizada por vários parques fotovoltaicos e microgerações, está disponível na mesma região geográfica. A água turbinada por algumas hídricas com bacias hidrográficas em comum está correlacionada embora com algum atraso temporal. O estudo de cargas também mostra algum tipo de dependências.

Apresenta-se neste capítulo a abordagem seguida na modelação das incertezas e a forma como se efectua a modelação da dependência entre variáveis.

4.1 - Modelação Linear

Estudou-se a dependência da carga em diferentes barramentos, assim como a produção de diferentes fontes, em diferentes barramentos.

Identificou-se algumas correlações, a título de exemplo pode ser visualizada na Figura 4.1 a dispersão, de duas produções, em barramentos distintos.

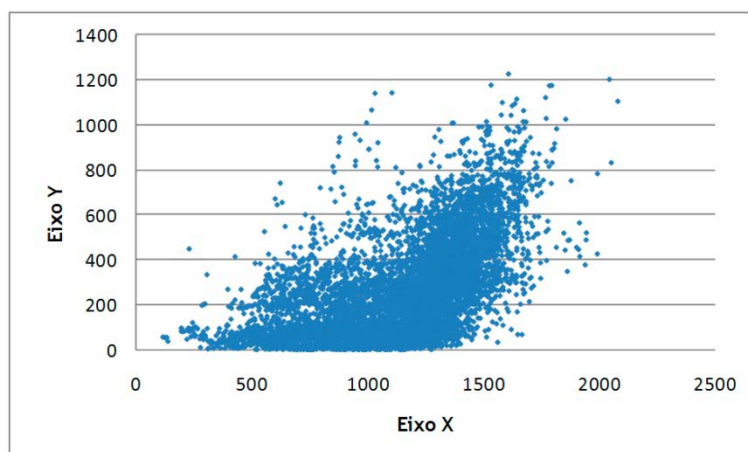


Figura 4.1 - Produção no Barramento N.º19 (abscissa) Vs Produção no Barramento N.º10 (ordenada).

Pretende-se parametrizar, uma das produções em função, do valor actual, da produção no outro barramento. A Figura 4.2 apresenta a metodologia utilizada na modelação linear realizada.

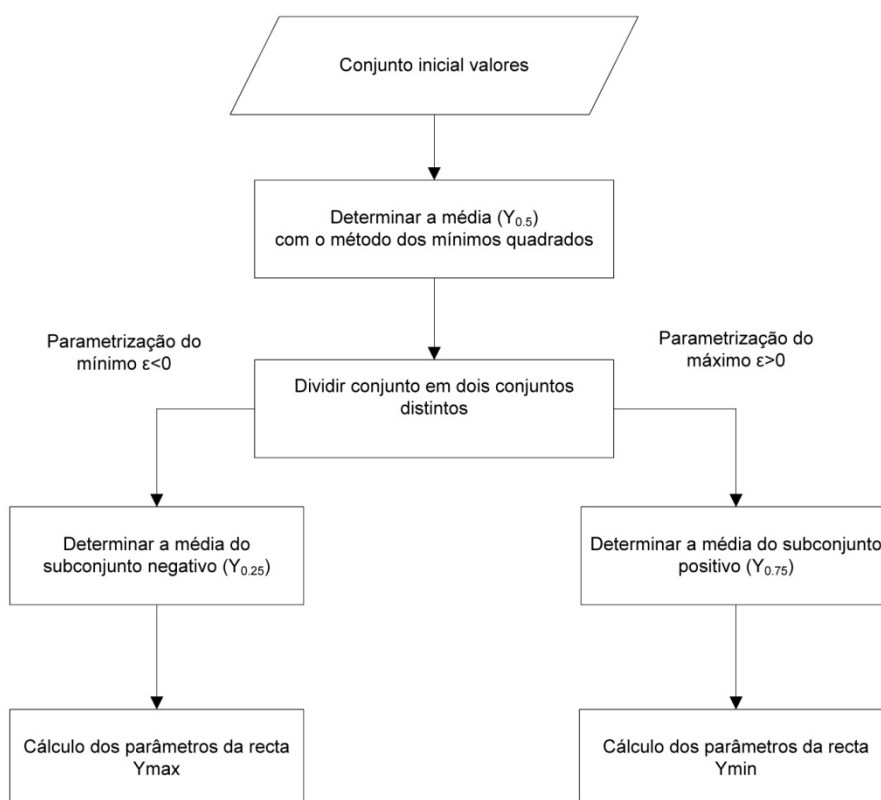


Figura 4.2 - Fluxograma da metodologia seguida na parametrização linear.

A primeira etapa consiste em efectuar uma regressão do conjunto inicial de dados por uma recta utilizando o método dos mínimos quadrados, equação (4.1), para obter os valores no eixo do Y em função da entrada no eixo do X.

$$\text{Min} \sum_{m=1}^n (Z_m - Y_m)^2 \quad (4.1)$$

Onde Z_m são os valores reais da potência gerada representados no eixo das ordenadas. Y_m é a equação de uma recta ($Y_m = m.x_m + b$), onde Y_m representa a regressão dos valores representados no eixo das ordenadas, sendo o valor das ordenadas obtido em função do valor da potência gerada no barramento das abcissas, representado por x_m na equação Y_m . Os coeficientes obtidos após regressão são m e b sendo que n representam o número total de valores da série.

A recta Y_m divide o conjunto inicial de valores em dois conjuntos distintos.

Dividindo o conjunto inicial em dois conjuntos distintos fazem-se novas regressões, utilizando o método dos mínimos quadrados, para determinar o valor esperado dos subconjunto inferior $Y_{0.25}$ e subconjunto superior $Y_{0.75}$.

Com este procedimento obtêm-se a parametrização de três rectas distintas, $Y_{0.5}$, $Y_{0.25}$ e $Y_{0.75}$, e os respectivos coeficientes associados. Para obter a parametrização limite do, máximo e mínimo, do intervalo somou-se os coeficientes das rectas obtidas anteriormente ($Y_{0.5}$, $Y_{0.25}$ e $Y_{0.75}$), como se demonstra nas equações (4.2), (4.3).

$$Y_{\max} = (2 \times m_{0.75} - m_{0.5})x + (2 \times b_{0.75} - b_{0.5}) = m_{\max}x + b_{\max} \quad (4.2)$$

$$Y_{\min} = (2 \times m_{0.25} - m_{0.5})x + (2 \times b_{0.25} - b_{0.5}) = m_{\min}x + b_{\min} \quad (4.3)$$

Esta metodologia foi idealizada para aplicação em conjuntos difusos, de seguida apresenta-se um exemplo ilustrativo do funcionamento.

4.1.1 - Exemplos ilustrativos

Neste subcapítulo apresentam-se dois exemplos distintos de modelação das dependências. O primeiro exemplo apresenta a modelação linear das produções nos barramentos N.º10 e N.º19. No segundo exemplo, realiza-se a aplicação da mesma metodologia, mas aplicada ao consumo dos barramentos N.º10 e N.º19.

4.1.1.1 - Modelação de Produções

Utilizando conjuntos difusos para modelar as duas grandezas representadas na Figura 4.3, obtêm-se o seguinte resultado:

$$\tilde{P}_g(N.º10) = [0, 1222]$$

$$\tilde{P}_g(N.º19) = [112, 2083]$$

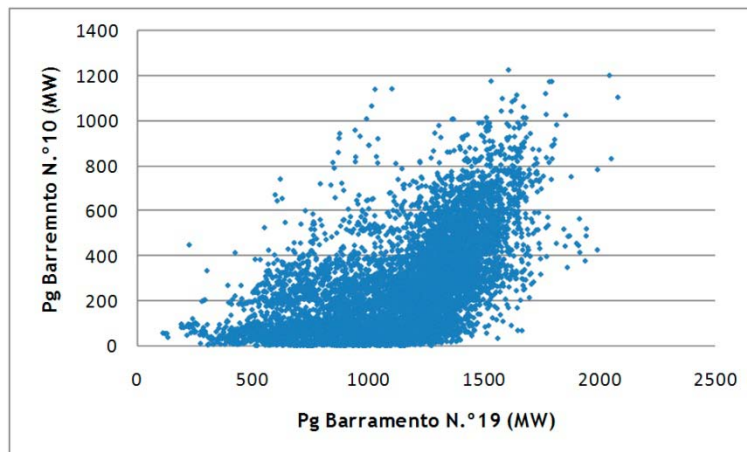


Figura 4.3 – Produção barramento N.º19 Vs produção no barramento N.º10.

Modelando o conjunto difuso, como o máximo e mínimo de cada produção, neste caso, está a introduzir-se incerteza porque expande-se o domínio de soluções possíveis.

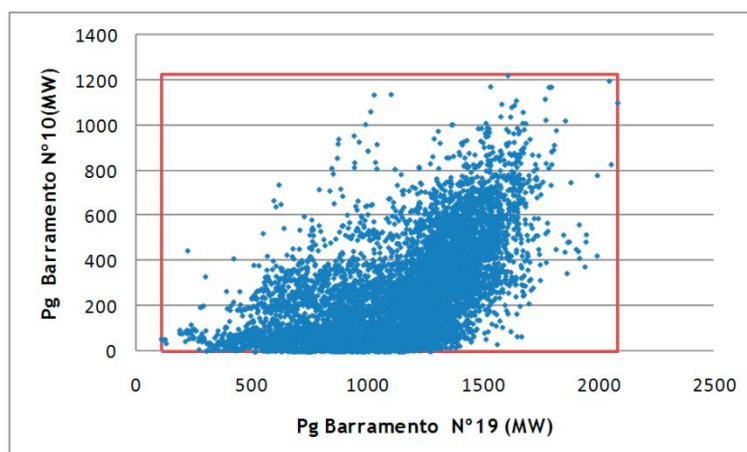


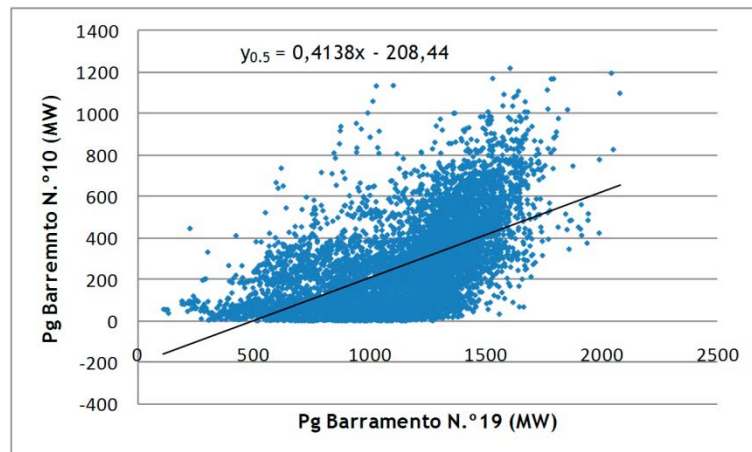
Figura 4.4 - Soluções possíveis face a soluções reais.

Na Figura 4.4, pode-se visualizar o domínio das soluções possíveis (interior do rectângulo representado), adoptando a modelação de máximo e mínimo de geração. Em comparação com os valores históricos, pode-se concluir que com esta modelação são introduzidas soluções que na realidade não se concretizam.

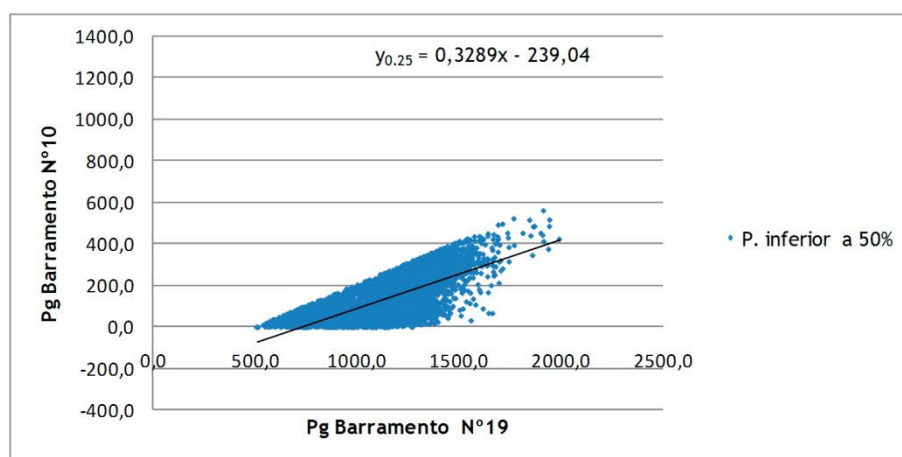
A técnica apresentada de seguida tem, como objectivo, restringir o conjunto de soluções possíveis com modelação difusa, ao conjunto de soluções historicamente admissíveis.

Desse modo faz-se uma modelação dos valores, máximos e mínimos, de $\tilde{P}_g(N.º10)$ em função do valor que está a ser assumido na potência gerada no barramento N.º19.

Inicialmente fez-se uma regressão aos valores iniciais com o objectivo de obter o valor esperado, obtendo a recta $Y_{0.5}$, Figura 4.5.

**Figura 4.5** - Parametrização da recta $Y_{0.5}$.

Dividindo o conjunto inicial de pontos em dois conjuntos distintos, pode fazer-se a parametrização de duas rectas. Uma das rectas $Y_{0.25}$ representa o valor esperado do subconjunto inferior, Figura 4.6, e a recta $Y_{0.75}$ é a regressão do subconjunto superior, Figura 4.7.

**Figura 4.6** - Parametrização da recta $Y_{0.25}$.

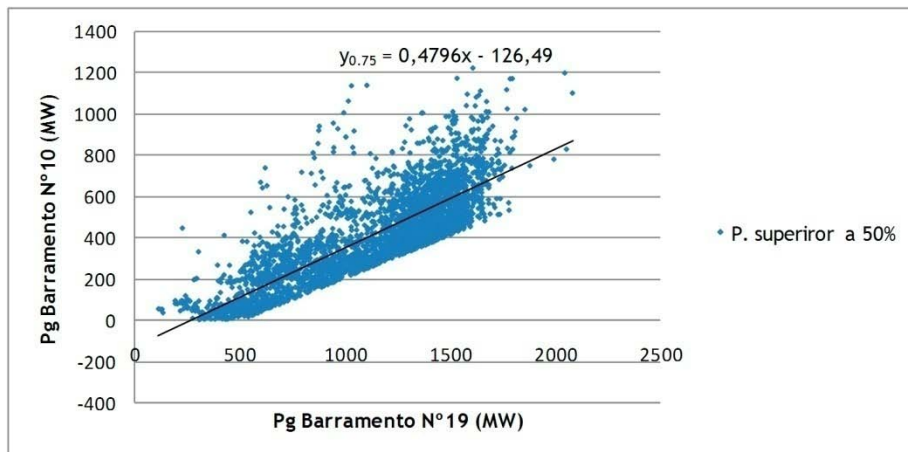


Figura 4.7 - Parametrização da recta $Y_{0.75}$.

Com o procedimento realizado até agora, foram parametrizadas 3 rectas, equação (4.4). Com estas equações pode-se calcular as duas equações extremas da parametrização, $Y_{\max}$ e $Y_{\min}$ segundo as equações (4.2), (4.3).

$$\begin{aligned} Y_{0.5} &= 0.4138x - 208.44 \\ Y_{0.25} &= 0.3289x - 239.04 \\ Y_{0.75} &= 0.4796x - 126.49 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Realizando os cálculos obtêm-se as equações (4.5), que servem para definir, o valor mínimo e máximo, do número difuso que representa a geração no barramento N.º10. Estas restrições serão utilizadas pelo modelo de trânsito de potências difuso descrito no capítulo cinco, aí será compreendida mais profundamente a utilidade desta modelação.

$$\begin{aligned} Y_{\min} &= 0.2441x - 269.64 \\ Y_{\max} &= 0.5453x - 44.58 \end{aligned} \quad (4.5)$$

A representação gráfica, do resultado obtido com esta parametrização pelas equações (4.5), pode ser visualizada na Figura 4.8.

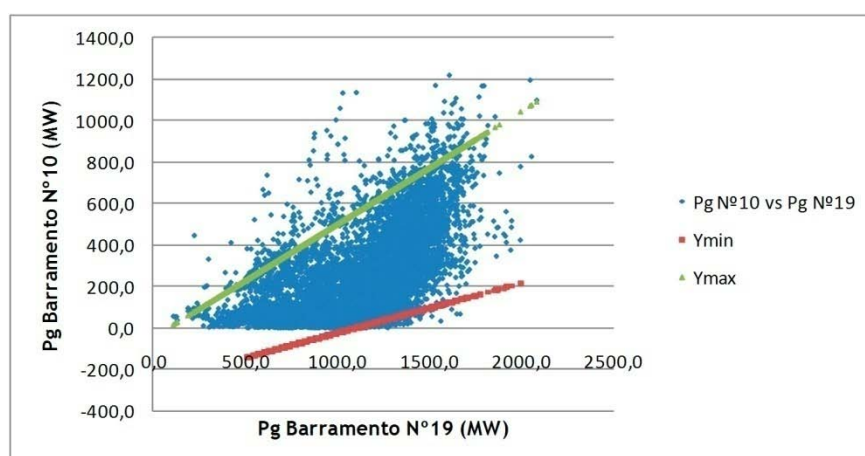


Figura 4.8 - Parametrização obtida.

Observando a figura pode-se concluir que, para valores de potência gerada inferiores a 1105 MW no barramento N.º19, o valor mínimo do número difuso será negativo. Esta situação não se verifica na realidade e, desse modo determinou-se que para valores inferiores a 1105MW de potência gerada no barramento N.º19 o valor mínimo de produção possível no barramento N.º10 é zero.

4.1.1.2 - Modelação das Cargas

Na Figura 4.9, pode-se visualizar o comportamento das cargas em dois barramentos distintos. Como se pode visualizar existe uma relação implícita que, de certo modo, resulta da modelação realizada anteriormente.

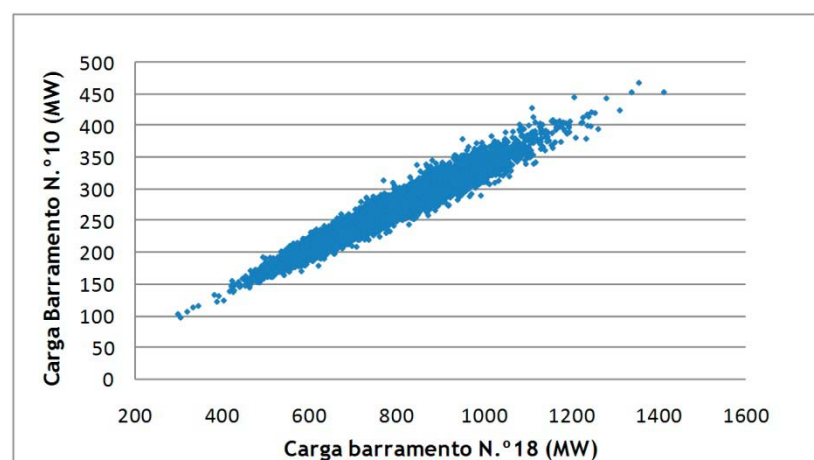


Figura 4.9 - Carga no barramento N.º10 em função do valor da carga no barramento N.º18.

A abordagem realizada modela a distribuição da carga no barramento N.º10 em função do valor da carga no barramento N.º18, utilizando para esse efeito duas rectas para definir o valor, mínimo e máximo, do valor da potência consumida no barramento número 10.

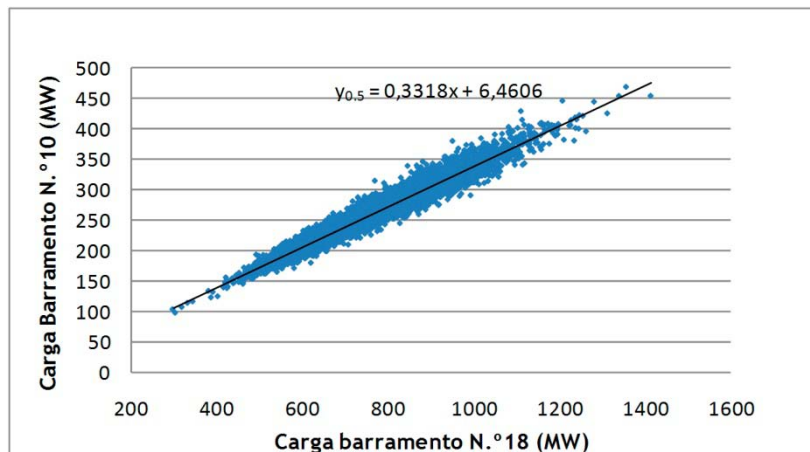


Figura 4.10 – Parametrização da recta $Y_{0.5}$.

Utilizando o método dos mínimos quadrados, faz-se uma regressão do conjunto inicial de dados por uma recta, $Y_{0.5}$. Representação gráfica visível na Figura 4.10. Com base na recta obtida pode-se dividir o conjunto inicial de pontos em dois conjuntos distintos.

A separação dos conjuntos permite efectuar a regressão de duas rectas, uma para cada conjunto, de modo a calcular a recta que indica o valor esperado do subconjunto inferior, Figura 4.11, e do subconjunto superior, Figura 4.12.

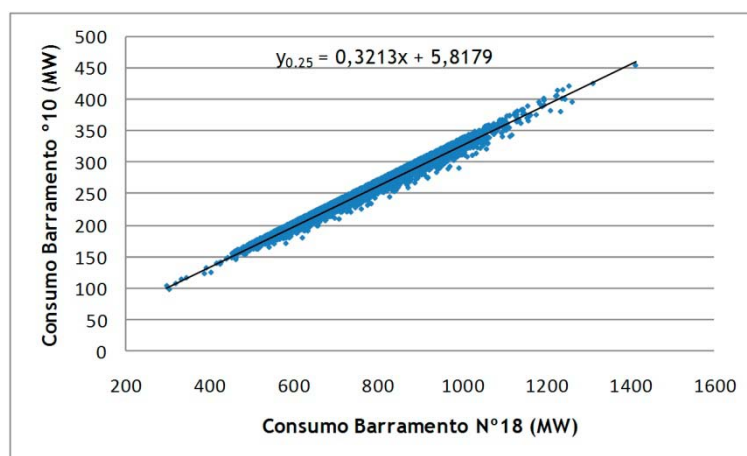


Figura 4.11 – Regressão para obtenção dos parâmetros da recta $Y_{0.25}$.

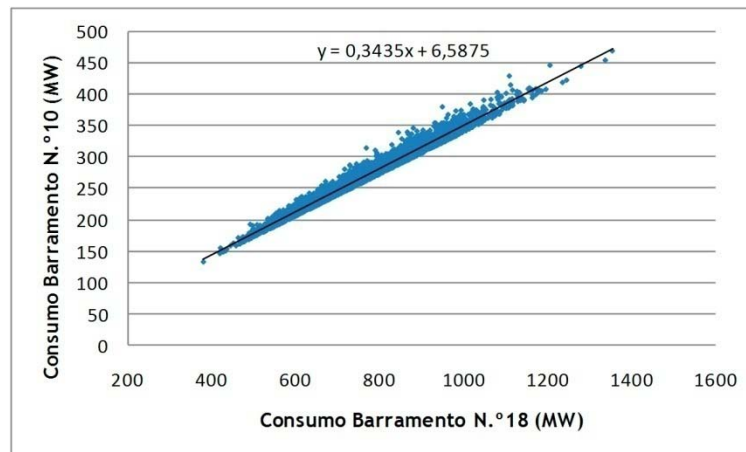


Figura 4.12 - Regressão para obtenção dos parâmetros da recta $Y_{0,75}$.

Com os resultados obtidos podem-se calcular as rectas que fazem a parametrização extrema do conjunto inicial de pontos, segundo as equações (4.2),(4.3), obtendo-se o seguinte resultado:

$$\begin{aligned} Y_{\min} &= 0.3108x + 5.1752 \\ Y_{\max} &= 0.3552x + 6.7144 \end{aligned} \quad (4.6)$$

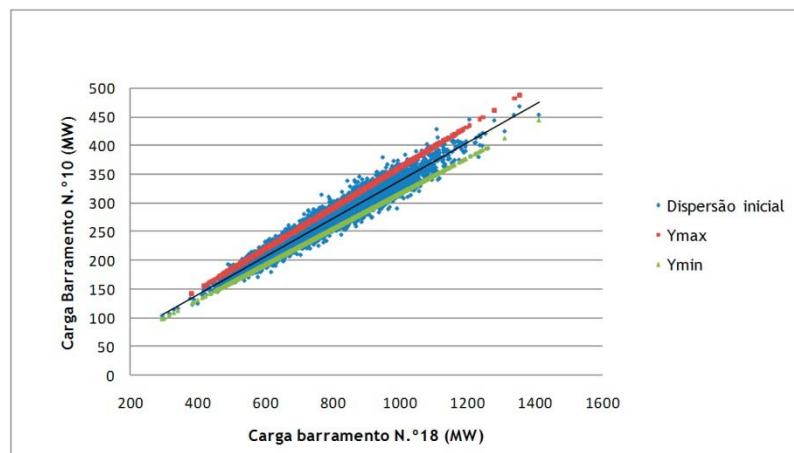


Figura 4.13 - Resultado da modelação linear do consumo.

As equações presentes em (4.6) determinam os limites, mínimo e máximo, que a carga no barramento N.º10 poderá ser. Na Figura 4.13 pode visualizar-se a representação gráfica da modelação realizada.

4.2 - Modelação Quadrática

Voltando a analisar a dispersão dos dois barramentos de consumo, Figura 4.14, pode-se visualizar que os extremos, superiores e inferiores, não são lineares, ou seja, estando a realizar uma aproximação por uma recta está-se sempre a cometer um erro por defeito ou

por excesso. Como resultado está-se a introduzir de soluções que não existem ou eliminando soluções que são possíveis.

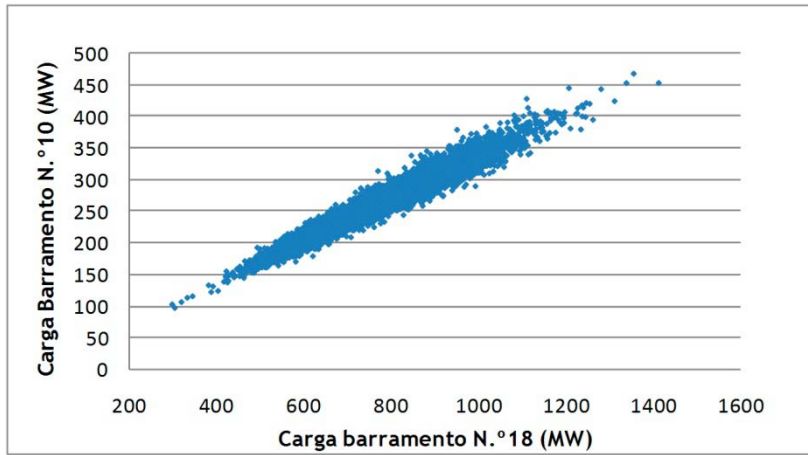


Figura 4.14 - Consumo barramento N.º18 vs consumo barramento N.º10.

Para se obter uma aproximação com menor erro aos pontos exteriores da distribuição existente, adoptou-se pela realização de uma regressão utilizando um polinómio de segundo grau.

Antes de fazer a regressão é necessário separar os pontos exteriores, denominados pontos fronteira. Os pontos fronteira foram separados filtrados uma função $f(x,y)$ tal que, introduzindo um intervalo de valores de x se procede, à maximização ou minimização da função, para se encontrar o máximo e mínimo de y para o respectivo intervalo de entrada.

Obtidos os pontos fronteira, máximos e mínimos, e utilizando um polinómio de segundo grau, realiza-se uma regressão utilizando o método dos mínimos quadrados.

$$\text{Min} \sum_{m=1}^n (Z_m - Y_m)^2 \quad (4.7)$$

Na equação (4.7), Z_m são os valores da potência gerada representados no eixo dos Y . Y_m é a equação de um polinómio de segundo grau ($Y_m = m_2 \cdot x_m^2 + m_1 \cdot x_m + b$), onde Y_m representa a regressão dos valores representados no eixo Y . O valor da potência gerada no barramento X é representado x_m . Os coeficientes obtidos após regressão são m_2 , m_1 e b .

4.2.1 - Exemplo Ilustrativo

Apresenta-se de seguida a modelação do consumo no barramento N.º10 pelo consumo no barramento N.º18. Inicialmente realizou-se a separação dos pontos fronteira do restante conjunto. Na Figura 4.15 pode visualizar-se os pontos que foram separados.

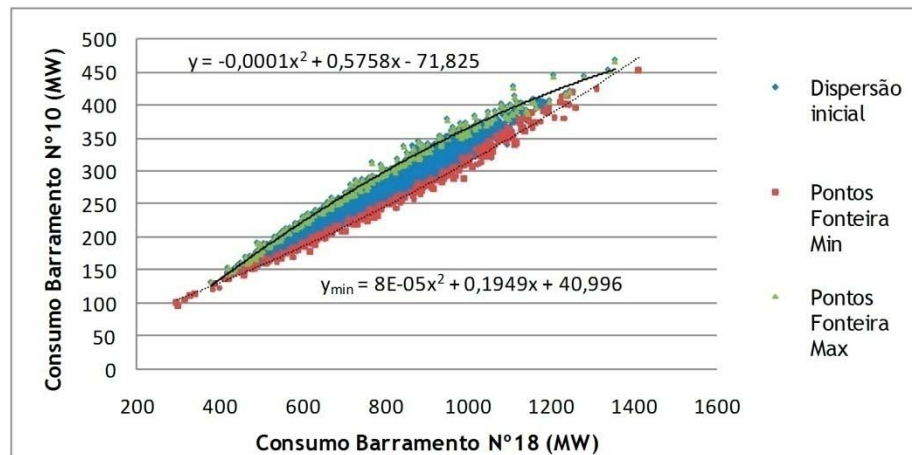


Figura 4.15 - Separação dos pontos fronteira.

Após a separação procedeu-se à regressão de cada um dos conjuntos, obtendo os coeficientes do polinómio de segundo grau, equações (4.8). O resultado gráfico pode ser visualizado na Figura 4.16.

$$\begin{aligned} Y_{\min} &= 8^{-5}x^2 + 0.1949x + 40.996 \\ Y_{\max} &= -0.00015x^2 + 0.6x - 80.077 \end{aligned} \quad (4.8)$$

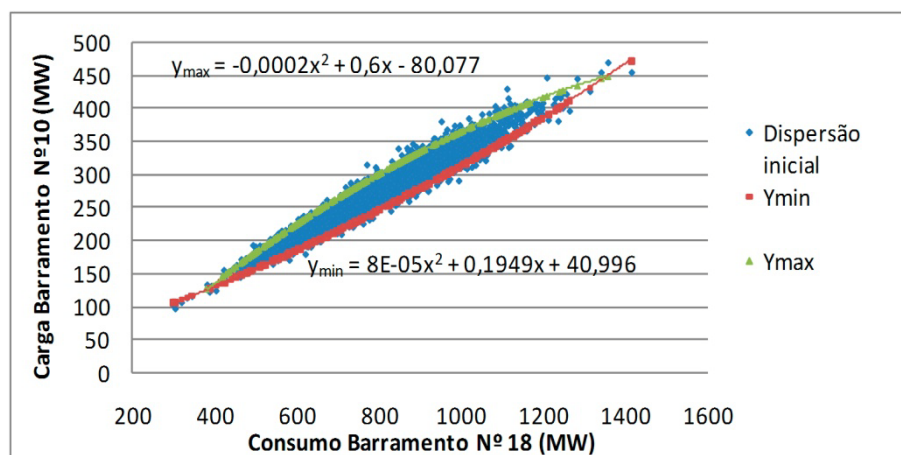


Figura 4.16 - Resultados da regressão dos pontos fronteira por um polinómio de segundo grau.

Concluído o processo pode observar-se que, a aproximação da dispersão inicial pelas duas funções polinomiais de segundo grau gera um resultado melhor do que a efectuada pelas duas rectas. Este resultado é melhor porque existe uma menor quantidade de pontos, da dispersão inicial, fora dos limites estabelecidos pelas equações $Y_{\min}$ e $Y_{\max}$. Existe ainda uma menor quantidade de pontos possíveis introduzidos que não pertencem ao conjunto de dados inicial.

Capítulo 5

Trânsito de Potências Difusos

Foi desenvolvido e implementado um algoritmo que permite, com base num trânsito de potência determinístico, incorporar a incerteza e dependências nas produções e consumos, desde que estas sejam modeladas por números difusos.

Este capítulo inicia-se abordando o modelo de trânsito de potências determinístico utilizado e o modo como este foi validado. Posteriormente aborda-se o modo como o trânsito de potências difuso foi implementado e a forma como foram implementadas as dependências entre grandezas.

5.1 - Trânsito de Potência Determinístico

O trânsito de potências determinístico implementado, para obter os fluxos de potências na rede, utiliza o algoritmo Newton-Raphson. Este é um algoritmo de referência na área de resolução de problemas de fluxo de potências porque se apresenta robusto e versátil.

Este algoritmo encontra-se exaustivamente descrito em diversa bibliografia, pelo que, aqui apenas se aborda o seu funcionamento geral.

Na Figura 5.1 encontra-se um fluxograma do funcionamento do algoritmo. Antes de se iniciar o processo iterativo é necessário especificar:

- tensões no barramento de compensação e referência (CR) e nos barramentos PV;
- indicar qual o ângulo associado ao barramento CR;
- calcular a matriz de admitâncias $Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$;
- indicar o valor inicial dos ângulos $\theta_i^{(0)}$, para todos os barramentos excepto o de referência;
- indicar o valor inicial das tensões $V_i^{(0)}$, para os barramentos PQ.

Especificados estes valores iniciais entra-se no processo iterativo. O primeiro passo consiste em calcular a equação de fecho (5.1) e avaliar se o algoritmo converge, este converge se o valor do cálculo da equação de fecho for inferior ao erro admissível especificado pelo utilizador.

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i^{SP} - P_i^{calc} \\ \Delta Q_i = Q_i^{SP} - Q_i^{calc} \end{cases} \begin{cases} P_i^{calc} = V_i \sum_k V_k \left(G_{ik} \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} \sin(\theta_{ik}) \right) \\ Q_i^{calc} = V_i \sum_k V_k \left(G_{ik} \sin(\theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\theta_{ik}) \right) \end{cases} \quad (5.1)$$

Se não convergir o processo iterativo contínua, realiza-se o cálculo da matriz Jacobiana, equação (5.2), onde a dimensão das sub-matrizes é dada pela Tabela 5.1. O cálculo das submatrizes H, N, M e L é realizado segundo as equações (5.3), e a dimensão das matrizes é calculada de acordo com a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Dimensão das submatrizes do Jacobiano.

Nº Barramentos PQ + PV	n
Nº Barramentos PQ	m
H	n x n
N	n x m
M	m x n
L	m x m

$$\begin{bmatrix} J^{(P)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(P)} & N^{(P)} \\ M^{(P)} & L^{(P)} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} i \neq k & \begin{cases} H_{ik} = L_{ik} = V_i V_k \left(G_{ik} \sin(\theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\theta_{ik}) \right) \\ N_{ik} = -M_{ik} = V_i V_k \left(G_{ik} \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} \sin(\theta_{ik}) \right) \end{cases} \\ i = k & \begin{cases} H_{ii} = -Q_i^{calc} - V_i^2 \cdot B_{ii} \\ M_{ii} = P_i^{calc} - V_i^2 \cdot G_{ii} \end{cases}, \begin{cases} N_{ii} = P_i^{calc} + V_i^2 \cdot G_{ii} \\ L_{ii} = Q_i^{calc} - V_i^2 \cdot B_{ii} \end{cases} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Por fim calcula-se a variação das tensões e ângulos, equação (5.4), e procede-se à actualização dos mesmos.

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}^{(P)} = \begin{bmatrix} H^{(P)} & N^{(P)} \\ M^{(P)} & L^{(P)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(P)} \quad (5.4)$$

Inicia-se a iteração seguinte e torna-se a realizar todo o procedimento até aqui descrito, e este processo é interrompido quando o algoritmo converge ou quando este se atinge o número máximo de iterações predefinidas.

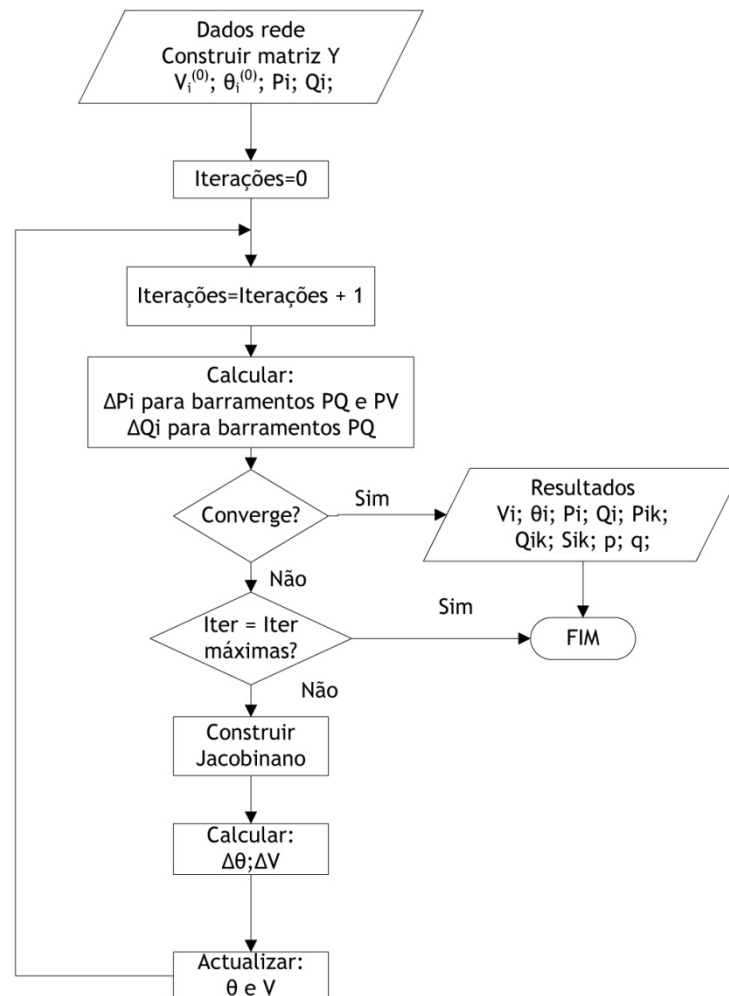


Figura 5.1 - Fluxograma explicativo do funcionamento do algoritmo Newton-Raphson aplicado à resolução de trânsito de potências.

5.1.1 - Validação Trânsito de Potências Determinístico

Implementado o modelo determinístico do trânsito de potência procedeu-se validação do mesmo, sendo que esta validação foi efectuada recorrendo ao software *PowerWorld Simulator*¹. Na Figura 5.2 pode-se visualizar o esquema da RNT reduzida implementada no software e os resultados obtidos nas duas implementações são iguais.

¹ Pode ser retirado um demo do software e dúvidas quanto ao seu funcionamento podem ser consultadas no endereço da internet da empresa [40].

Matematicamente o problema é definido em (5.5) para a maximização, sendo o processo semelhante para a minimização. O objectivo é otimizar uma variável Z , ou seja, encontrar ou seu máximo, para um determinado corte α , sendo que para a minimização é a mesma formulação apenas se procura o valor mínimo da variável Z . Este procedimento está sujeito a algumas restrições, a potência injectada, obtida como resultado, tem de pertencer sempre aos números difusos previamente definidos. As tensões resultantes nos barramentos CR e PV têm de ser iguais às tensões especificadas, e o ângulo do barramento CR igual a zero.

$$\begin{aligned}
 & \text{Max } \tilde{Z}(\alpha) = f(P_i, Q_i) \\
 & \text{Sujeito: } P_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad , \text{ todos os barramentos } i \\
 & \quad Q_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad , \text{ todos os barramentos } i \\
 & \quad P_i \in \tilde{P}_i(\alpha) \quad , \text{ todos os barramentos } i \quad (5.5) \\
 & \quad Q_i \in \tilde{Q}_i(\alpha) \quad , \text{ todos os barramentos } i \\
 & \quad V_i = V_i^{SP} \quad , \text{ barramentos PV e CR} \\
 & \quad \theta_{CR} = 0
 \end{aligned}$$

Não está definido no conjunto de equações (5.5), mas as tensões nos barramentos PV e CR podem ser alvo de optimização, é exactamente esta modificação que é integrada no conjunto de equações (5.6), onde pode-se verificar a forma como é integrada a optimização das tensões nos barramentos PV e CR, como consequência destas alterações a variável $\tilde{Z}(\alpha)$ é calculada em função da potência injectada activa e reactiva e tensões nos barramentos PV e CR.

$$\begin{aligned}
 & \text{Max } \tilde{Z}(\alpha) = f(P_i, Q_i, V_i) \\
 & \text{Sujeito: } P_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad , \text{ todos os barramentos } i \\
 & \quad Q_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad , \text{ todos os barramentos } i \\
 & \quad P_i \in \tilde{P}_i(\alpha) \quad , \text{ todos os barramentos } i \quad (5.6) \\
 & \quad Q_i \in \tilde{Q}_i(\alpha) \quad , \text{ todos os barramentos } i \\
 & \quad V_i \in \tilde{V}_i(\alpha) \quad , \text{ barramentos PV e CR} \\
 & \quad \theta_{CR} = 0
 \end{aligned}$$

Na Figura 5.3 encontra-se um fluxograma explicativo do funcionamento do modelo (5.5). Inicialmente é necessário calcular números difusos das potências injectadas e fazer a especificação dos valores iniciais para o trânsito de potências determinístico.

De seguida é necessário indicar o procedimento de optimização a utilizar, ou se maximiza ou se minimiza a variável $Z(\alpha)$. Esta variável pode ser uma tensão em determinado barramento, o trânsito de potência activa ou reactiva numa das linhas, a potência aparente numa linha ou perdas activas ou reactivas em determinada linha. Depois de escolher a variável é preciso definir qual o procedimento de optimização que se pretende adoptar, maximizar ou minimizar.

A seguinte etapa consiste em adicionar as restrições ao modelo. Como restrições são incluídas as descritas no modelo (5.5) e podem ainda ser incluídas as restrições:

- de circulação de potência activa, reactiva ou aparente nas linhas;
- de limites das perdas numa determinada linha;
- de limites das tensões num barramento PQ.

As restrições a incluir podem ser activas ou passivas, ou seja, uma restrição passiva fixa o limite, seja este mínimo ou máximo, num valor fixo, enquanto nas restrições activas o valor da restrição sofre, ou pode sofrer, um ajuste em cada iteração.

A inclusão de restrições activas faz com que seja necessário actualizar a cada iteração não só os valores de P_i e Q_i , mas actualizar também os valores máximos e mínimos de cada restrição activa. As equações obtidas nas modelações de incertezas do capítulo 4 são utilizadas para determinar o limite máximo de mínimo em cada iteração do algoritmo.

De seguida inicia-se o processo iterativo, corre-se um trânsito de potência determinístico. De seguida calculam-se os resultados que este fornece e verifica-se se as restrições são respeitadas, caso não sejam respeitadas o processo iterativo volta ao início. Caso sejam respeitadas verifica-se se o processo iterativo pode parar sendo que ele pára se o valor de convergência previamente especificado for atingido, caso não seja atingido é verificado se foram atingidas o número máximo de iterações. Se não forem atingidas o processo iterativo continua voltando ao início.

A programação deste algoritmo foi realizada no *Microsoft Excel* utilizando a linguagem de programação *Visual Basic*. A utilização deste programa permite uma interface visual e fornece uma ferramenta de optimização o *Solver*, sendo esta utilizada na optimização da variável $\tilde{Z}(\alpha)$. Uma descrição das funcionalidades desta ferramenta e dos algoritmos incluídos pode ser encontrado em [41] e [42].

Revelou-se ao longo deste trabalho que o conjunto inicial de valores da potência injectada utilizados no trânsito de potências determinístico influencia a convergência, podendo o algoritmo parar em máximos ou mínimos locais. A velocidade de convergência também é afectada, pelo que o conjunto inicial de potências injectadas deve ser estudado de modo a acelerar a velocidade de convergência e evitar que o algoritmo fique preso em máximos e mínimos locais.

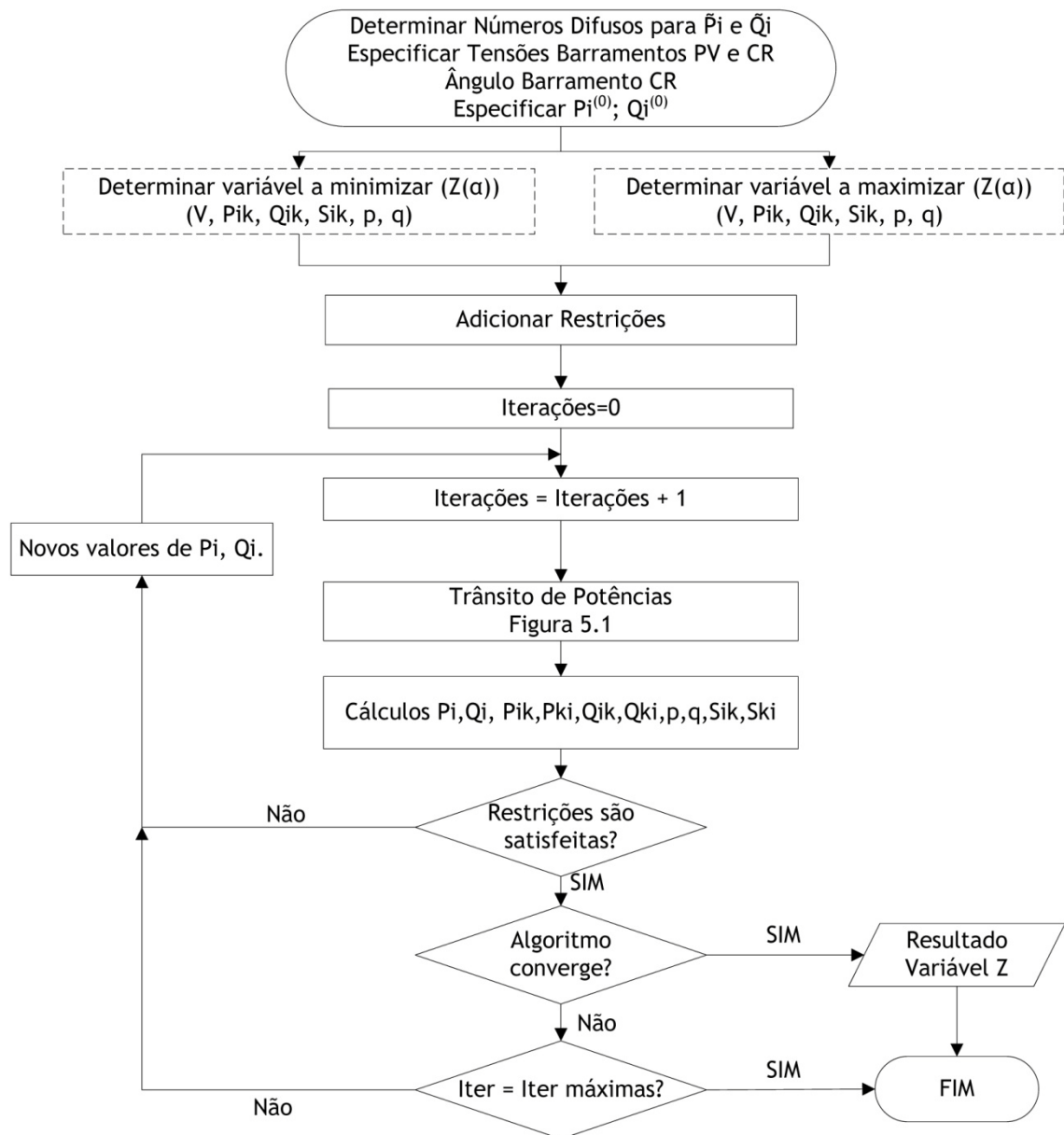


Figura 5.3 - Fluxograma explicativo do funcionamento do trânsito de potências difuso.

Capítulo 6

Desempenho dos Modelos

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o modelo de trânsito de potências difuso. No início do capítulo aborda-se o modo como se modela os resultados dos trânsitos de potência determinísticos para comparação com os resultados obtidos com o modelo de trânsito de potências difuso.

Posteriormente são apresentados os resultados obtidos com o modelo de trânsito de potências difuso sem incorporar a modelação da relação entre variáveis e por fim apresentam-se resultados incorporando a modelação da relação entre variáveis.

6.1 - Trânsitos Determinísticos

Para se poder obter uma comparação com os resultados dos modelos difusos relativamente aos trânsitos de potência reais, foram modeladas as entradas e resultados dos milhares de trânsitos de potência determinísticos de todos os casos recolhidos. Os modos como foram obtidos os valores e a algumas modelações realizadas encontram-se descritas no capítulo 3.

Partindo do registo anual recolhido, calculou-se as potências injectadas para cada barramento e executaram-se 8760 trânsitos de potência determinísticos. Desta forma obtiveram-se os estados que ocorreram no sistema durante um ano de funcionamento, sendo os resultados e as entradas modelados como números difusos triangulares.

Para se efectuar uma modelação com números difusos calcula-se o máximo e mínimo que os valores reais atingem, sendo este intervalo dividido em nove subintervalos iguais com o fim de calcular a frequência de valores dentro de cada subintervalo, deste modo está-se a agrupar as séries de resultados para se conseguir aproximar a distribuição de valores por um número difuso. (Ver exemplos de pontos na Figura 6.1, Figura 6.2 e Figura 6.3).

Um exemplo de aproximações realizadas pode ser visualizado na Figura 6.1, Figura 6.2 e Figura 6.3 onde estão representadas as distribuições de valores acumulados criadas e a respectiva frequência. Encontra-se também a aproximação realizada por um número difuso triangular.

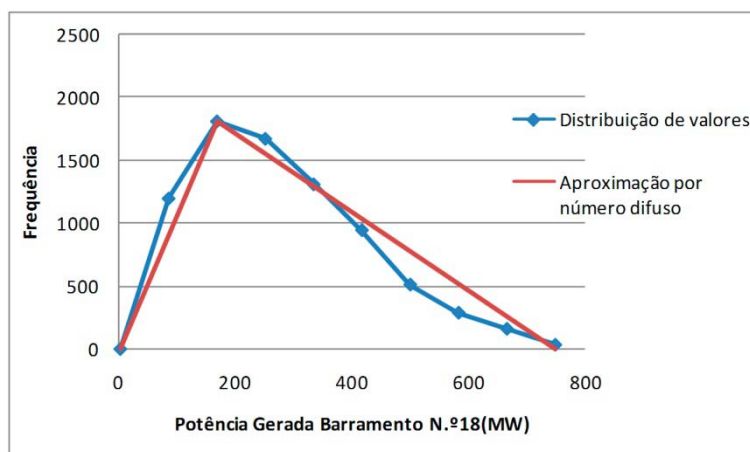


Figura 6.1 - Aproximação por um número difuso da potência gerada no barramento N.º18.

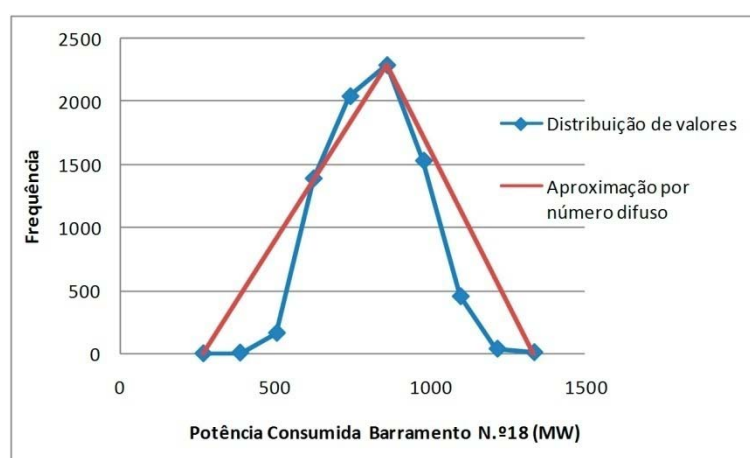


Figura 6.2 - Aproximação por um número difuso da potência consumida no barramento N.º18.

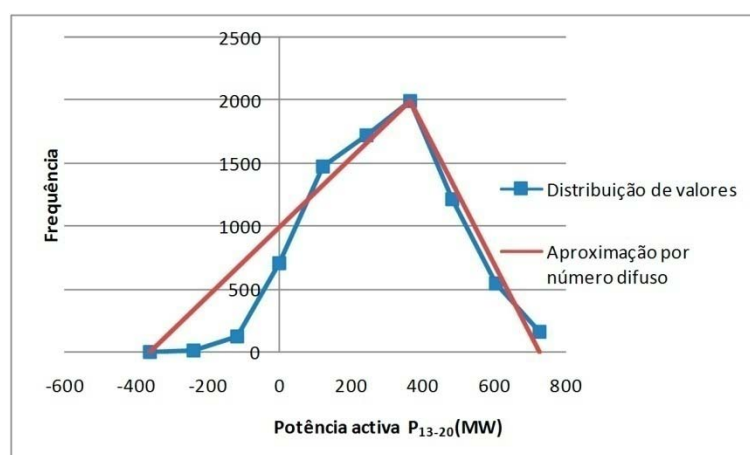


Figura 6.3 - Aproximação por um número difuso da potência ativa na linha 13-20.

Estas aproximações das distribuições reais de valores são úteis para se proceder à comparação dos números difusos reais com os números difusos obtidos por simulação utilizando o trânsito de potências difuso. A escala indicada no gráfico como frequência dos

valores iniciais é convertida para uma escala de nível de pertença quando se aproxima por um número difuso, desta forma as possibilidades serão indicadas dentro de um intervalo $[0,1]$.

6.2 - Resultados do Trânsito de Potências Difuso

As simulações apresentadas utilizam o modelo (5.5) de trânsito de potências difuso, onde as tensões nos barramentos PV e CR são iguais em todas as simulações. Foram realizadas diversas simulações e nas próximas secções apresentam-se alguns resultados obtidos, nomeadamente a análise de resultado incorporando a modelação de dependências entre barramentos.

Nas diversas simulações realizadas as tensões nos barramentos PV e CR não se alteram, considerando-se o valor de 1.02 p.u. em cada um desses barramentos.

6.2.1 - Sem Modelação de Incerteza

A primeira simulação realizou-se sem se considerar qualquer interdependência entre variáveis pretendendo-se avaliar a diferença na largura do intervalo, utilizando a parametrização realizada na secção anterior para as variáveis de entrada do trânsito de potências.

Na Figura 6.4 está representada uma comparação entre o resultado obtido na Figura 6.3 e o resultado proveniente do trânsito de potências difuso, conclui-se desta forma que utilizando a mesma largura de intervalo nas variáveis de entrada, obtém-se na saída do trânsito de potências difuso, um número difuso com uma maior largura do que o que acontece na realidade.

O aumento da largura dos números difusos verifica-se para todas as linhas e para além da potência activa, também na representação difusa da potência reactiva, aparente e das perdas, se verifica um aumento da largura dos números difusos.

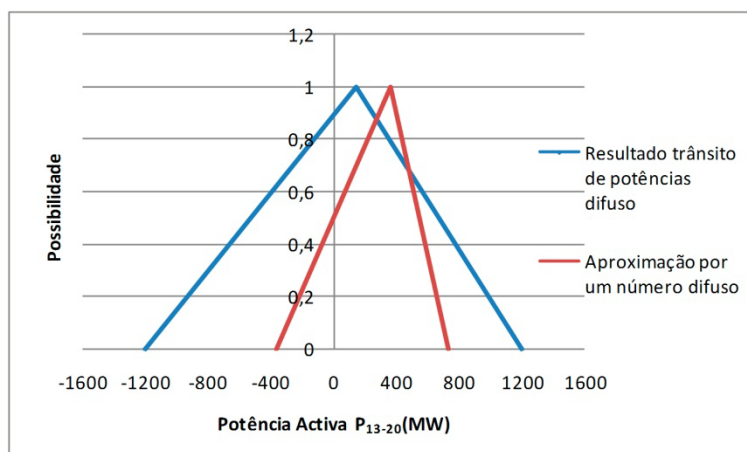


Figura 6.4 - Comparação dos valores reais versus o resultado obtido utilizando o trânsito de potências difuso.

6.2.2 - Inclusão da Modelação de uma Produção

Na Figura 6.4 pode-se visualizar um aumento da largura do intervalo, com o propósito de diminuir a largura desse intervalo fizeram-se modelações de dependências entre barramentos e incluíram-se essas dependências entre incertezas como restrições activas no modelo baseado no conjunto de equações (5.5).

A primeira hipótese formulada incluí a modelação da produção de dois barramentos. O barramento N.º10 modelado pelo barramento N.º19, subcapítulo 4.1.1.1. O resultado para a linha 13-20 pode ser visualizado na Figura 6.5, não se percebe pelo gráfico uma grande modificação porque de facto o limite mínimo manteve-se inalterado enquanto o limite máximo diminuiu 11MW. Os números difusos representados de seguida demonstram isso mesmo, à esquerda encontra-se o número obtido como resultado do trânsito de potências difuso sem dependências modeladas, à direita encontra-se o número que foi obtido como resultado do trânsito de potências difuso com a produção modelada.

$$\tilde{P}_{13-20} = [-1201; 144; 1194]$$

$$\tilde{P}_{13-20} = [-1201; -60; 1183]$$

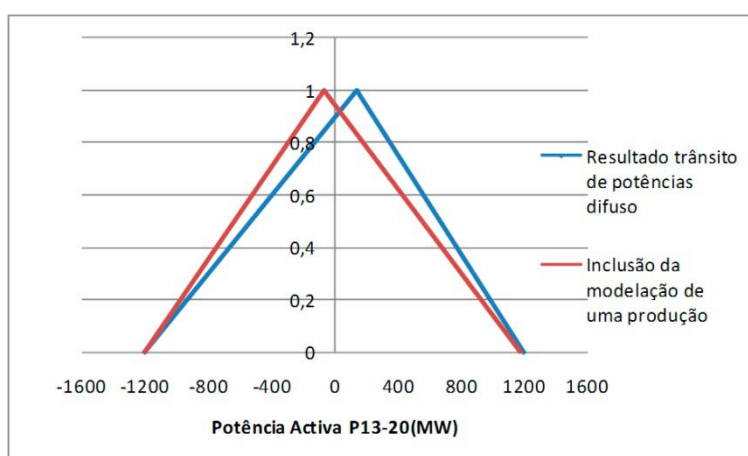


Figura 6.5 - Resultado da modelação da dependência entre dois barramentos de produção.

Fazendo modelações desta forma consegue-se diminuir a largura do intervalo, no entanto nem em todas as linhas se verificou um decréscimo da largura do número difuso com esta modelação.

Aplicar apenas uma modelação não é o suficiente para diminuir a largura do intervalo para que este se aproxime dos valores que se atingem na realidade, assim sendo conclui-se que existe a necessidade de incluir mais dependências entre variáveis.

6.2.3 - Inclusão da Modelação Linear das Cargas

De forma a tentar reduzir mais a largura dos números difusos incorporou-se, no trânsito de potências difuso, a modelação linear das cargas apresentada no subcapítulo 4.1.1.2., sendo que esta modelação é realizada para todos os barramentos onde existe consumo. Os modelos incorporados estudam a dependência do consumo entre cada um dos barramentos e o barramento N.º18. É ainda incluída a modelação do consumo, previamente apresentada, entre dois barramentos de produção.

Na Figura 6.6 pode-se visualizar os resultados obtidos para a potência activa na linha 13-20 com a inclusão das dependências entre barramentos de consumo, onde o ponto central do número difuso sofre um deslocamento em virtude da modelação central realizada. Quanto aos extremos do número difuso pode-se visualizar que estes valores são menores tal como pretendido.

De seguida apresenta-se o número difuso obtido, onde se pode verificar numericamente os resultados obtidos. Do lado esquerdo encontra-se o número difuso inicial obtido com o trânsito de potências difuso e do lado direito o número obtido após a inclusão da modelação linear das cargas. Os resultados representam uma diminuição de 3.5% na largura do número difuso.

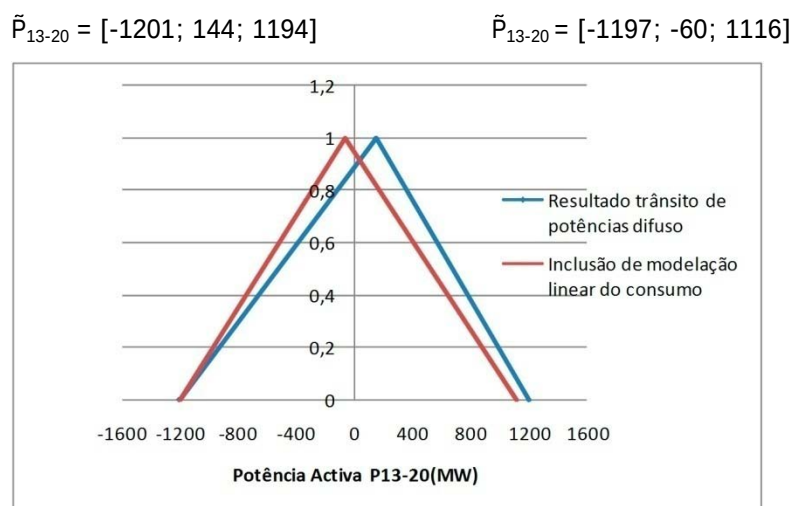


Figura 6.6 - Resultado da modelação linear da dependência entre barramentos de consumo na linha 13-20.

Os resultados apresentados na Figura 6.6 não são gerais, ou seja, existem linhas onde se verifica uma diminuição da largura do número difuso maior do que em outras. Na Figura 6.7 encontra-se o resultado obtido para a circulação de potência activa na linha 15-16. Neste

caso a largura do número difuso diminuiu 20.3%, o que representa um melhor resultado face ao caso anterior.

No final do parágrafo estão representados numericamente os números difusos obtidos, à esquerda encontra-se o número difuso ao qual se pretende diminuir a largura e do lado direito apresenta-se o número obtido como resultado da modelação linear das cargas.

$$\tilde{P}_{15-16} = [-587; -70; 449] \quad \tilde{P}_{15-16} = [-443; -70; 384]$$

Verificou-se através dos resultados obtidos que, adoptando a modelação linear do consumo existe uma diminuição da largura do número difuso que varia de 0.8% a 20.3% e com uma média de 7.1% de diminuição.

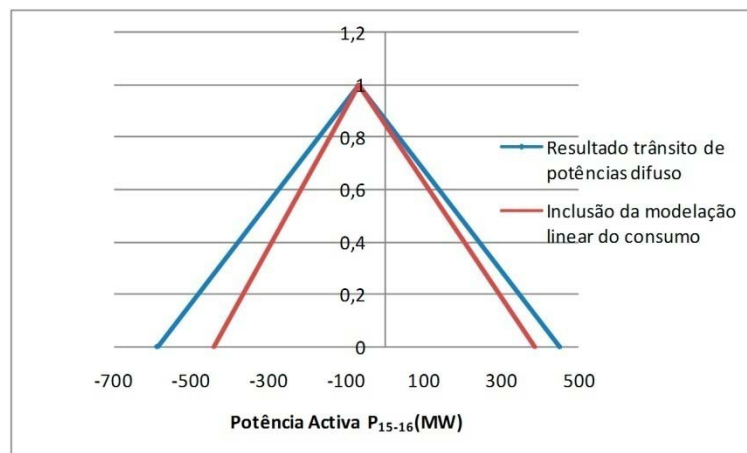


Figura 6.7 - Resultado da modelação linear da dependência entre barramentos de consumo na linha 15-16.

6.2.4 - Inclusão da Modelação Quadrática das Cargas

Este subcapítulo apresenta resultados obtidos utilizando a modelação das cargas demonstrada no subcapítulo 4.2. onde se adopta um polinómio de segundo grau para aproximar os limites da dispersão da carga entre dois barramentos. Os resultados apresentados incluem a modelação de todos os barramentos em função do barramento N.º18.

Na Figura 6.8 encontra-se o resultado para a circulação de potência activa na linha 13-20 onde se pode visualizar a representação gráfica do resultado. Relativamente ao número difuso inicial consegue-se uma diminuição do intervalo de 4.2%, o que em comparação com a modelação anterior revela um estreitamento de 0.7%.

$$\tilde{P}_{13-20} = [-1201; 144; 1194] \quad \tilde{P}_{13-20} = [-1182; -60; 1114]$$

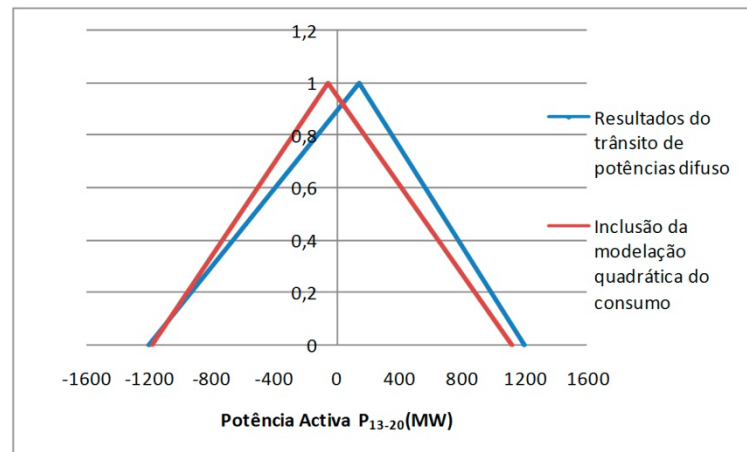


Figura 6.8 - Resultado da modelação quadrática da dependência entre barramentos de consumo na linha 13-20.

Apresenta-se na Figura 6.9 a representação gráfica do resultado obtido para a circulação de potência activa na linha 15-16. Pode-se calcular a partir dos números difusos abaixo indicados que este resultado representa uma diminuição da largura do intervalo de 35% quando comparado com o valor inicial. Comparando com o resultado obtido na modelação anterior pode-se verificar uma diminuição de 14.7%.

$$\tilde{P}_{15-16} = [-587; -70; 449]$$

$$\tilde{P}_{15-16} = [-310; -70; 364]$$

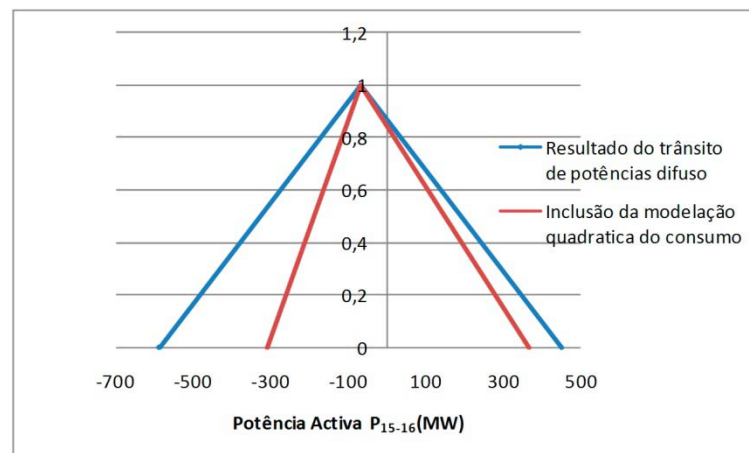


Figura 6.9 - Resultado da modelação quadrática da dependência entre barramentos de consumo na linha 15-16.

Analisando os resultados obtidos com esta modelação a largura dos números difusos apresentam uma diminuição entre 1.3% a 35.04% e uma média de diminuição de 10.7%

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

As constantes modificações a que os sistemas eléctricos estão sujeitos levantam novos desafios na sua operação, planeamento e expansão. A presente dissertação estudou algumas metodologias que pretendem reduzir o impacto do aumento da incerteza associada às novas formas de produção de energia eléctrica e à liberalização do mercado de electricidade.

Desta forma, realizou-se um estudo sobre a RNT reduzida e utilizaram-se, sempre que possível, dados reais de produções e consumo. O estudo baseou-se na implementação inicial de um trânsito de potências determinístico sobre o qual foi implementado, de uma forma original, um trânsito de potências difuso. Pretende-se que estas ferramentas sejam tão flexíveis quanto possível para que ideias posteriores ou aplicações possam ser integradas ao modelo já implementado, tendo sempre como objectivo processar a incerteza associada às entradas do trânsito de potências e propagá-la.

De forma a alimentar os modelos é necessário modelar a incerteza associada às variáveis de entrada do trânsito de potências.

Foram modeladas incertezas na produção eólica incluindo correlações de velocidade de vento entre parques eólicos próximos e foram estabelecidas as dependências das velocidades de vento, entre a produção em cada parque. Realizou-se um levantamento geográfico dos parques eólicos nacionais, no entanto não foi possível concluir este estudo porque não se conseguiram obter os dados pretendidos para a criação dos modelos. Não abandonando a ideia, realizou-se uma modelação das dependências das velocidades de vento entre barramentos, sendo esta modelação baseada nos coeficientes de correlação de um estudo existente.

Outra modelação realizada estudou a dependência de produções entre barramentos. A modelação apresentada tem como objectivo a utilização em trânsitos de potência difusos e consiste em parametrizar os limites das dispersões de valores históricos entre duas produções em dois barramentos distintos de modo a diminuir o espaço de soluções possível. A abordagem inicial parametriza os limites por uma recta onde se efectuam sucessivas regressões conseguindo-se parametrizar o limite superior e inferior por uma recta.

Em determinadas situações a abordagem anterior não se revela a mais adequada, sendo a modelação das cargas um exemplo dessa situação porque os limites, máximo e mínimo, das

dispersões da carga entre dois barramentos revelam uma forma quadrática e desse modo adoptou-se um polinómio de segunda ordem para realizar a modelação.

Para se conseguir uma base de comparação simularam-se todos os registos disponíveis no trânsito de potências determinístico sendo posteriormente os resultados modelados como números difusos.

As relações entre variáveis incorporadas como restrições activas, no trânsito de potências difuso, demonstraram conseguir diminuir a largura do número difuso na saída obtendo-se um conjunto de possíveis estados do sistema mais restrito e próximo realidade. A diminuição da largura dos números difusos varia para o trânsito de potência cada linha de forma diferente para cada grandeza do trânsito de potências. No caso da potência activa verificam-se diminuições máximas de 35% relativamente ao trânsito de potências difuso executado sem qualquer restrição.

Propõe-se como trabalho futuro a criação de um trânsito de potência probabilístico que permita incorporar dependências entre barramentos. Posteriormente com os resultados obtidos dos modelos de trânsito de potências difuso e probabilístico poderá criar-se uma ferramenta capaz de comparar resultados das duas formulações, difuso e probabilístico, de trânsitos de potência integrando incertezas.

Propõe-se ainda a exploração da ideia de criar modelos capazes de inferir relações de incerteza de velocidades de vento, entre parques eólicos relativamente próximos, recorrendo a previsões ou medições de velocidades de vento nos locais em causa.

Referências

- [1] Sousa, J, N. M. S. e Monteiro, C. D. M., “Previsão da produção eléctrica em parques eólicos”, Universidade Porto [s. n.], 2007. Tese de mestrado Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2007.
- [2] Tinney, W.F.; Hart, C.E., "Power Flow Solution by Newton's Method", IEEE PAS, vol.PAS-86, no.11, pp.1449-1460, Nov. 1967.
- [3] Stott, B., "Review of load-flow calculation methods", Proceedings of the IEEE, vol.62, no.7, pp. 916-929, July 1974.
- [4] Stott, B., "Decoupled Newton Load Flow", IEEE PAS , vol.PAS-91, no.5, pp.1955-1959, Sept. 1972.
- [5] Stott, B.; Alsac, O., "Fast Decoupled Load Flow", IEEE PAS, vol.PAS-93, no.3, pp.859-869, May 1974.
- [6] Happ, H., “Parallel Processing in Power Systems”, Electrical Power & Energy Systems, 1982, vol.4, N.º1.
- [7] Oyama, T., Kitahara, T., Serizawa, Y., “Parallel Processing in Power Systems Analysis Using Band Matrix”, IEEE Trans. PWRS, vol. PWRS-5, N.º3, 1990.
- [8] Gomez, A., Betancourt, R. “Implementation of the Fast Decoupled Load Flow on a Vector Computer”, IEEE Trans. PWRS, vol. PWRS-5, N.º3, 1990.
- [9] Yin, X., Gernay, N., “Investigations on Solving the Load Flow Problem by Genetic Algorithms”, Electric Systems Research, vol. 22, N.º3, 199.
- [10] EL-Dib, A.A.; Youssef, H.K.M.; EL-Metwally, M.M.; Osman, Z., "Load flow solution using hybrid particle swarm optimization", Electrical, Electronic and Computer Engineering, 2004. ICEEC '04. 2004 International Conference on, vol., no., pp. 742-746, 5-7 Sept. 2004.

- [11] Borkowska, B., "Probabilistic Load Flow", IEEE PAS, vol.PAS-93, no.3, pp.752-759, May 1974.
- [12] Allan RN, Borkowska B, Grigg CH. "Probabilistic analysis of power flows". Proc IEEE 1974; 121(12):1551-6.
- [13] R. N. Allan, C. H. Grigg, and M. R. G. Al-Shakarchi, "Numerical techniques in probabilistic load flow problems", Int. J. Numerical Methods Eng. 10, pp. 853-860, 1976.
- [14] R. N. Allan and M. R. G. Al-Shakarchi, "Probabilistic a.c. load flow", Proc. Inst. Elect. Eng. 123, no. 6, pp. 531-536, 1976.
- [15] Allan RN, Al-Shakarchi MRG. "Probabilistic techniques in AC load flow analysis". Proc IEEE 1977;124(2):154-60.
- [16] Leite da Silva, A.M.; Allan, R.N.; Soares, S.M.; Arienti, V.L., "Probabilistic load flow considering network outages", *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, vol.132, no.3, pp.139-145, May 1985.
- [17] Leite da Silva, A.M.; Arienti, V.L., "Probabilistic load flow by a multilinear simulation algorithm," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings* , vol.137, no.4, pp.276-282, Jul 1990.
- [18] P. Caramia, G. Carpinelli, P. Varilone, P. Verde, "Probabilistic three-phase load flow", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 21, Issue 1, January 1999, Pages 55-69, ISSN 0142-0615, DOI: 10.1016/S0142-0615 (98) 00030-1.
- [19] G. Carpinelli, V. Di Vito, P. Varilone, "Multi-linear Monte Carlo simulation for probabilistic three-phase load flow", *European Transactions on Electrical Power*, Volume 17, Issue 1, 2007.
- [20] P. Zhang and S. T. Lee, "Probabilistic load flow computation using the method of combined Cumulants and Gram-Charlier expansion," *IEEE Trans. PWRs*, vol. 19, no. 1, pp. 676-682, Feb. 2004.
- [21] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Inf. Control*, no. 8, pp. 338-353, Aug. 1965.
- [22] G.J. Klir and B. Yuan, eds., "Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems": Selected Papers by Lotfi A.Zadeh (World Scientific, Singapore, 1996).
- [23] V. Miranda, M. A. Matos, "Distribution System Planning with Fuzzy Models and Techniques", *CIREN 89*, Brighton 1989.
- [24] J. T. Saraiva, V. Miranda and M. A. Matos, "Fuzzy Load Flow - New Algorithms Incorporating Uncertain Generation and Load Representation", in *Proceedings of the 10th PSCC*, Butterworths, London, 1990.

- [25] J. T. Saraiva, V. Miranda and M. A. Matos, "Generation and Load Uncertainties Incorporated in Load Flow Studies", proceedings of MELECON 91, Ljubljana, May 1991.
- [26] M. A. Matos., E. Gouveia, "The Fuzzy Power Flow Revisited", in Proceedings of the 2005 IEEE Ptech, St Petersburg, 2005.
- [27] Gouveia, E.; Matos, M.A., "Constrained Fuzzy Power Flow," *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne* , pp.1314-1319, 1-5 July 2007.
- [28] Eduardo M. Gouveia, Manuel A. Matos, "Symmetric AC fuzzy power flow model", *European Journal of Operational Research*, In Press, Corrected Proof, Available online 13 March 2008, ISSN 0377-2217, DOI: 10.1016/j.ejor.2007.12.044.
- [29] R. N. Allan and M. R. G. Al-Shakarchi, "Linear dependence between nodal powers in probabilistic a.c. load flow", *Proc. IEE*, vol. 124, no. 6, pp. 529-534, Jun. 1977.
- [30] Leite da Silva, A.M.; Arienti, V.L.; Allan, R.N., "Probabilistic Load Flow Considering Dependence Between Input Nodal Powers", *IEEE PAS*, vol.PAS-103, no.6, pp.1524-1530, June 1984.
- [31] J. T. Saraiva, F. O. Duarte, "Enhanced Fuzzy Power Flow Models Integrating Correlation Between Nodal Injections", in *Proceedings of the Melecon'96*, Ban, Italy.
- [32] J. T. Saraiva, N. Fonseca, M. A. Matos, Fuzzy Power Flow, "An AC Model Addressing Correlated Data", in *Proc PMAPS'04*, Ames, Iowa, September 2004.
- [33] Maria Helena Osório Pestana de Vasconcelos, "Avaliação e controlo de segurança de redes interligadas com grande penetração eólica com base em métodos de aprendizagem automática", Tese de doutoramento Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2007.
- [34] Curvas de oferta e procura: disponível em <http://www.omel.es> clicar: Resultados de Mercado, Acesso arquivos; Acedido em Janeiro de 2009.
- [35] Lista de centrais presentes no Mercado Ibérico de electricidade: Disponível em <http://www.omel.es> clicar: Resultados de Mercado, Pronta Unidades, Lista de Unidades; Acedido em Janeiro de 2009.
- [36] Estatística diária: disponível em <http://www.centrodeinformacao.ren.pt> clicar: Informação Exploração; Estatística Diária; ao fundo do lado direito clicar: Diagrama; acedido em Janeiro de 2009.
- [37] Durst, C. S., "The statistical variation of wind with distance", in *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 86, issue 370, pp. 543-549, doi: 10.1002/qj.49708637012.

- [38] Caracterização da Rede Nacional de Transporte para efeitos de acesso à rede em 31 Dezembro 2007: disponível em <http://www.centrodeinformacao.ren.pt> clicar: Publicações; Caracterização da RNT; Acedido em Janeiro de 2009.
- [39] Mapa Georreferenciado da RNT: disponível em <http://www.centrodeinformacao.ren.pt> clicar em: Informação Técnica, Mapa da RNT Georreferenciado; Acedido em Janeiro 2009.
- [40] PowerWorld Corporation: disponível em <http://www.powerworld.com>; Acedido em Janeiro 2009.
- [41] "On-Line Solver Tutorial", <http://www.solver.com>; Acedido em Janeiro de 2009.
- [42] Daniel Fylstra, Leon Lasdon, John Watson and Alan Waren, "Design and Use of the Microsoft Excel Solver", in INFORMS INTERFACES 28: 5, pp. 29-55, September-October 1998.
- [43] Allan, R.N., Leite da Silva, A.M., and Burchett, R.C.: 'Evaluation methods and accuracy in probabilistic load flow solutions', IEEE Trans., 1981, PAS-100, pp. 2539-2546.