

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**Avaliação Probabilística em Regime Permanente
Considerando as Incertezas Associadas à Carga
dos Veículos Elétricos**

Rosana Albertina Machado Teixeira dos Santos

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

Orientador: Prof. Dr. Mauro Augusto da Rosa
Co Orientador: Eng. Miguel Heleno

Fevereiro, 2012.

A Dissertação intitulada

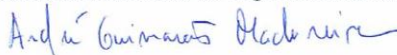
“Avaliação Probabilística em Regime Permanente Considerando as Incertezas
Associadas à Carga dos Veículos Eléctricos”

foi aprovada em provas realizadas em 20-02-2012


o júri



Presidente Professor Doutor João Abel Peças Lopes
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor André Guimarães Madureira
Professor Auxiliar da Universidade Lusófona



Doutor Mauro Augusto da Rosa
Investigador do INESC - PORTO



Mestre Miguel Heleno
Investigador do INESC-PORTO

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



Autor - Rosana Albertina Machado Teixeira dos Santos

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para a avaliação do impacto da integração de veículos elétricos na rede de transporte, no sentido de melhorar o planejamento a médio e longo prazo.

Para tal, foram aplicadas metodologias probabilísticas com o objetivo de incluir a incerteza inerente à carga dos veículos elétricos. Estas metodologias foram usadas para a análise em regime permanente das tensões e trânsitos de potência da rede.

Após uma comparação das metodologias apresentadas na literatura, recorrendo a resultados preliminares, optou-se por adotar uma metodologia analítica, utilizando distribuições discretas de probabilidade no sentido de obter uma metodologia eficiente, do ponto de vista computacional, capaz de ser aplicada em redes de grande dimensão.

Para complementar a metodologia, um modelo probabilístico de representação da carga dos veículos elétricos foi modificado de modo a ser utilizado em avaliações de regime permanente.

O método adotado foi aplicado a uma rede teste IEEE 14 barramentos, ilustrando assim o efeito da integração dos veículos elétricos. Para a inclusão da incerteza dos veículos elétricos foram feitas algumas alterações nos dados de entrada da rede teste tendo em conta as distribuições de probabilidade baseadas no modelo de representação dos veículos elétricos.

Abstract

This thesis aims to present a methodology to assess the impact of electric vehicles on the transmission system in order to support mean and long-term planning decisions in this sector.

Some probabilistic methodologies were applied so that the uncertainty regarding electric vehicles could be included in the analysis. These methodologies were used in a steady state evaluation to obtain voltages and power flows in the system.

Taking into account a comparison of the probabilistic methodologies presented in the literature, as well as preliminary evaluations, an analytical method was chosen. Furthermore, probability discrete distributions were adopted in order to address the uncertainty of the electric vehicles in an efficient way.

In order to enhance the methodology, a probabilistic model of electric vehicles was modified to be used in steady state evaluations.

After these improvements, the method was applied to a small test system (*IEEE 14 bus test case*) considering some modifications according to the probabilistic model that characterizes the vehicles charging load. Hence, the impact of electric vehicles integration in transmission grids was illustrated.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos os que me apoiaram durante a realização da dissertação especialmente pela paciência e compreensão.

Ao meu orientador Prof. Dr. Mauro Augusto da Rosa e co orientador Eng. Miguel Heleno por toda a sua disponibilidade, apoio e conselhos concedidos para a realização do trabalho.

À Unidade de Sistemas de Energia do INESC Porto pelos recursos disponibilizados, gostava de agradecer ao Leonardo Bremermann pela ajuda prestada na parte final do trabalho.

À minha mãe Conceição, pela oportunidade, esforço e suporte prestado ao longo de toda a minha vida.

Ao Vitor, pela compreensão, motivação e apoio em todo o percurso académico.

À minha família pelo apoio e motivação que sempre demonstraram.

Para finalizar, a todos os meus amigos, pela amizade e companheirismo.

A todos, um sincero obrigado por tornarem este trabalho possível.

Índice

Resumo	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos	ix
Índice.....	xi
Lista de figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Abreviaturas	xvii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Motivação da Dissertação.....	1
1.2 - Objetivos da Dissertação	2
1.3 - Estrutura da Dissertação.....	2
Capítulo 2	3
Estado da Arte.....	3
2.1 - Veículos elétricos	3
2.1.1 - Abordagens de Gestão	3
2.1.2 - Cenários e Metas	4
2.2 - Trânsito de Potências Determinístico	10
2.2.1 - Modelo DC.....	11
2.2.2 - Trânsito de potências AC	12
2.3 - Considerando Incertezas no Trânsito de Potências	15
2.3.1 - Trânsito de potências Probabilístico	15
2.3.2 - Trânsito de potências <i>Fuzzy</i>	17
Capítulo 3	21
Metodologias do Trânsito de Potências Probabilístico	21
3.1 - Metodologias Analíticas.....	21
3.2 - Metodologias Numéricas.....	31
3.3 - Discussão	32
3.3.1 - Linearizações nas Metodologias Numéricas	32
3.3.2 - Linearização nas Metodologias Analíticas: Exemplo de Aplicação a um Sistema de Seis Barramentos.	38
3.4 - Conclusão	42
Capítulo 4	43

Modelo de Carga de Veículos Elétricos.....	43
4.1 - Modelos.....	43
4.1.1 - Mobilidade da População.....	43
4.1.2 - Processo de Contagem do Número de Veículos Elétricos nos Pontos de Carregamento ou estações de Carregamento.....	46
4.1.3 - Estratégias de carregamento das baterias dos VEs.....	47
4.1.4 - Cálculo da Carga Associada aos Veículos Elétricos.....	47
4.1.5 - Construção das distribuições de chegadas de VEs para análise em regime permanente - trânsito de potência probabilístico.....	49
Capítulo 5	53
Resultados.....	53
5.1 - Trânsito de potências, a partir de método convencional sem introdução de VEs.....	53
5.2 - Trânsito de potências a partir do método convencional com introdução de VEs.....	54
5.3 - Trânsito de potências a partir do método probabilístico com introdução da incerteza na carga dos VEs.....	57
Capítulo 6	61
Conclusões e Trabalho Futuro.....	61
6.1 - Conclusões.....	61
6.2 - Trabalho Futuro.....	61
Referências.....	63
Anexo A - Descrição dos Sistemas Teste.....	65

Lista de figuras

Figura 2-1 - Vendas de veículos por tipo de motor.....	4
Figura 2-2 - Total de vendas por região até 2020.	4
Figura 2-3 - Número de pontos de carregamento esperados.	7
Figura 2-4 - Nível de energia na bateria.....	8
Figura 2-5 - Geração para o sistema elétrico português previsto com 61% de VEs.	9
Figura 2-6 - Comparação entre as três estratégias de carregamento.	10
Figura 2-7- Fluxograma do processo iterativo do método de Newton-Raphson.	14
Figura 2-8- Função de densidade de probabilidade Normal com médias e desvios padrões diferentes. ...	16
Figura 2-9 - Função densidade de probabilidade Discreta.	16
Figura 3-1- Fluxograma BLF para as variáveis de estado.	25
Figura 3-2 - Função densidade de probabilidade parcialmente truncada.	26
Figura 3-3 - Divisão em intervalos da função de densidade de probabilidade de D.	28
Figura 3-4 - Função densidade de probabilidade Normal e respetivo valor discreto.	29
Figura 3-5 - Relação entre o número de valores discretos de cada função/erro e o tempo de cálculo. ...	30
Figura 3-6 - Partilha do impulso para TRF.....	31
Figura 3-7 - Função densidade de probabilidade utilizando o método de Monte Carlo linear e método de Monte Carlo exato para 5000 sorteios na linha 1-2 e $\rho=1$	32
Figura 3-8 - Função densidade de probabilidade utilizando o método de Monte Carlo linear e método de Monte Carlo exato para 5000 sorteios na linha 9-14 e $\rho=15$	33
Figura 3-9 - Função densidade de probabilidade utilizando o método de Monte Carlo linear e método de Monte Carlo exato para 5000 sorteios na linha 2-3 e $\rho=15$	33
Figura 3-10 - Função densidade de probabilidade método de Monte Carlo exato e linear para 5000 sorteios na linha 1-2.....	34
Figura 3-11 - Função densidade de probabilidade método de Monte Carlo exacto e linear combinando multilinearizações para 5000 sorteios na linha P1-2.	34
Figura 3-12 - Função densidade de probabilidade método de Monte Carlo linear combinando multilinearizações para 5000 sorteios na linha Q2-3.	35
Figura 3-13 - Função densidade de probabilidade utilizando método de Monte Carlo linear para diferentes números de sorteios.....	36
Figura 3-14- Função densidade de probabilidade utilizando método de Monte Carlo exato e linear.	36
Figura 3-15 - Função densidade de probabilidade utilizando método de Monte Carlo exato para uma função com forma irregular.	37
Figura 3-16 - Função densidade de probabilidade utilizando método de Monte Carlo exacto e linear.	37
Figura 3-17 - Forma da função obtida para tensões obtidas com linearizações com o valor esperado. ...	39

Figura 3-18 - Forma de onda obtida para tensões obtidas com linearizações com o valor esperado, com incerteza mais elevada.	40
Figura 3-19 - Função de densidade de probabilidade para o trânsito de potência reativa na linha 8, para diferentes pontos de linearização.	41
Figura 3-20 - Forma de onda obtida combinando as 3 formas de onda obtidas para o trânsito de potência reativa na linha 8.	41
Figura 4-1 - Distribuição horária das chegadas de automóvel.....	45
Figura 4-2 - Distribuição horária das viagens por motivo.	45
Figura 4-3 - Distribuições da potência associada ao carregamento dos VEs.	50
Figura 5-1 - Comparação do módulo das tensões nos barramentos para o cenário sem VEs e com VEs. ...	55
Figura 5-2 - Trânsito de potência ativa nas várias linhas para o cenário sem VEs e com VEs.	57
Figura 5-3 - Módulo da tensão nos barramentos 3 e 4.....	58
Figura 5-4 - Transito de potência ativa na linha 1.....	58
Figura 5-5 - Transito de potência ativa na linha 3.....	59
Figura 5-6 - Transito de potência ativa na linha 6.....	59
Figura A-1 - Topologia da rede de 14 barramentos.....	66

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 - Anúncios de metas de vendas de VEs e PHVEs.	5
Tabela 2-2 - Número VEs e VEHPs vendidos no Reino Unido.	6
Tabela 2-3 - Energia esperada para cada cenário.	6
Tabela 3-1- Combinação das soluções obtidas para os diferentes pontos de linearização.	27
Tabela 4-1- Estatísticas de mobilidade nos dias de semana.	44
Tabela 4-2- Número de viagens nos dias de semana discriminadas por transporte e por motivo.	44
Tabela 5-1 - Módulo e desfasamento da tensão para cada barramento sem VEs.	53
Tabela 5-2 - Potência ativa e reativa para cada linha sem VEs.	54
Tabela 5-3 - Distribuição de carga de VEs pelos barramentos.	54
Tabela 5-4 - Módulo e desfasamento da tensão para cada barramento com VEs sem incerteza.	55
Tabela 5-5 - Potência ativa e reativa para cada linha com VEs sem incerteza.	56
Tabela A-1 - Classificação dos barramentos.	65
Tabela A-2 - Características das linhas.	65
Tabela A-3 - Características da rede de teste IEEE 14 barramentos.	66

Lista de Abreviaturas

BLF	<i>Boundary Load Flow</i>
DC	Corrente Contínua
EC	Estação de Carregamento
VE	Veículo Elétrico
FOR	<i>Forced Outage Rate</i>
MCI	Motor de Combustão interna
PC	Ponto de Carregamento
VEHP	Veículo Elétrico Híbrido Plug-in
TL	Transformada de Laplace
TLC	Teorema de Limite Central
TPC	Trânsito de Potências Convencional
TRF	Transformada Rápida de Fourier

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo, é apresentado o problema do impacto na rede de transporte considerando a futura integração, em grande escala, de veículos elétricos (VEs) nos sistemas elétricos de energia. A motivação e os objetivos do trabalho realizado são também apresentados ao longo deste capítulo. O estudo realizado durante o desenvolvimento desta dissertação também procura responder a duas *research questions* que delinearão o trabalho desenvolvido.

1.1 - Motivação da Dissertação

Desde há algum tempo que as preocupações com as elevadas emissões de CO₂ no meio ambiente, que atualmente se verificam, têm levado os setores industriais e públicos a investirem em investigações relacionadas com a mitigação de emissão de gases nocivos ao meio ambiente. Ao mesmo tempo, mantendo a preocupação da sustentabilidade das soluções encontradas. Neste contexto, os VEs surgem com o objetivo de abrandar a emissão de gases nocivos ao meio ambiente, onde é sabido que o setor de transportes é um dos maiores responsáveis pelos níveis de CO₂ encontrados atualmente em nossa atmosfera. Assim, de forma análoga aos geradores eólicos, que inicialmente não causavam impactos no sistema de energia elétrica devido a sua baixa utilização, os VEs também devem ser alvo de estudos iniciais com baixa utilização e posteriormente vistos para uma integração em grande escala. Neste sentido, as incertezas oriundas dos mesmos, podem impactar significativamente no sistema de energia elétrica, tanto a nível de planeamento como de operação.

Desta forma, os VEs são vistos pelos sistemas de energia elétrica como uma carga agregada à carga convencional do sistema. Entretanto, esta carga não segue o perfil de curva de carga convencional, pois o número de VEs que chegam a um ponto de carregamento num determinado tempo pode ser considerado uma variável aleatória que neste trabalho será tratada ou aproximada por uma distribuição de Poisson. Perante este processo, deseja-se considerar a incerteza associada à carga dos VEs na condução dos estudos de avaliação em regime permanente do impacto dos VEs nas redes de transporte. Para tal, algumas metodologias de trânsito de potências probabilístico serão estudadas e apresentadas ao longo deste documento.

1.2 - Objetivos da Dissertação

O objetivo principal deste estudo é encontrar uma metodologia adequada para efetuar a avaliação em regime permanente do impacto dos VEs nas redes de transportes dos sistemas de energia elétrica considerando a incerteza inerente ao processo de representação da carga dos VEs. A condução dos estudos realizados foi conduzida por duas *research questions* que definem o objetivo desta dissertação:

- Como avaliar as incertezas inerentes à representação da carga associada à mobilidade elétrica?
- Que métodos de trânsito de potência se adaptam melhor ao tipo de incerteza associada a carga dos VEs?

A busca pelas respostas destas *research questions* passou pelo estudo de alguns métodos de trânsito de potência probabilístico, assim como pela representação da mobilidade da população que define a representação da carga dos VEs. Estes estudos também são apresentados ao longo deste documento.

1.3 - Estrutura da Dissertação

Este documento encontra-se dividido em seis capítulos. No capítulo 1, a motivação e problema, assim como os objetivos relacionados aos estudos realizados são apresentados. No capítulo 2 o estado da arte que envolve os assuntos tratados por esta dissertação é discutido. No capítulo 3, pode-se encontrar a descrição e comparação entre as metodologias de trânsito de potência probabilístico. No seguimento deste, o modelo de carga adotado para representar a carga dos VEs é apresentado no capítulo 4 deste documento. O capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos a partir de estudos realizados sobre alguns sistemas testes. Por fim, no capítulo 6 as conclusões e futuros trabalhos são apresentadas.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 - Veículos elétricos

Veículos elétricos (VEs) são veículos que obtêm toda a energia que necessitam, incluindo energia para o motor elétrico e para os dispositivos auxiliares, a partir de baterias elétricas. A criação de veículos elétricos deve-se à preocupação com o elevado nível de emissão de CO₂ junto das populações ou mesmo de um modo geral. Esta preocupação levou ao desenvolvimento de veículos com maiores rendimentos face aos tradicionais veículos com MCI.

A principal diferença entre VEs e veículos com MCI deverá ser a forma como obtêm energia para alimentar os seus circuitos, enquanto os veículos com MC obtêm uma grande parte da energia que necessitam através de derivados de petróleo, os VEs obtêm essa energia através de baterias que são carregadas pela rede elétrica.

Apesar do funcionamento dos VEs ter um ótimo princípio, para manterem uma autonomia aceitável as baterias dos VEs têm de possuir uma capacidade de energia bastante elevada, o que provoca um custo muito elevado para estes veículos quando comparados com os MCI.

Uma solução encontrada para fazer frente a este cenário e reduzir o custo das baterias é o desenvolvimento de veículos elétricos híbridos plug-in (VEHPs). Os VEHPs combinam ambas as tecnologias, o motor de combustão interna e o motor elétrico. Estes novos veículos híbridos tem uma capacidade de autonomia para viajar durante 40km com energia das baterias, como podemos ver em [1], e podem fazer o carregamento dessa mesma bateria através da rede elétrica.

2.1.1 - Abordagens de Gestão

Como é possível ver em [1] a integração de VEs tem vindo a aumentar em todo o mundo, devido a preocupações com o meio ambiente e flutuações nos mercados que fazem com que o preço dos derivados de petróleo tenham um preço inconstante e o uso de veículos com MCI não sejam uma opção económica.

Para assegurar a transição de MCI para VEs é importante a criação de boas infraestruturas de carregamento para permitir aos condutores o carregamento adequado durante o dia. A maioria dos veículos elétricos deve ser capaz de usar saídas padrão e sistema domésticos para um carregamento lento, que poderá ser adotado durante a noite. O carregamento público deve

ser possível fazer-se em escritórios, centros comerciais ou em estacionamentos de rua em carregamento lento ou rápido.

2.1.2 - Cenários e Metas

Na figura 2-1, retirada de [1] podemos ver como se comporta a evolução de vendas de veículos, por tipo de motor, até 2050.

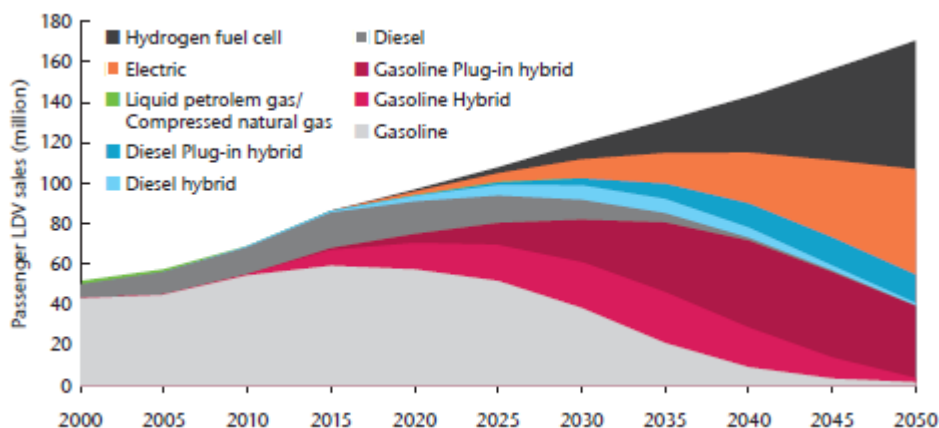


Figura 2-1 - Vendas de veículos por tipo de motor.

O volume de vendas de veículos MCI para VEs e VEHPs torna-se bastante significativo em 2050, logo prevê-se que o carregamento das baterias seja uma parcela importante no consumo de energia elétrica, nas redes do futuro.

Em particular, a partir de 2040, nota-se um aumento de vendas de VEs em relação aos VHEs. Este aumento é possível se a venda em grande escala de VEHPs, durante os anos anteriores, possibilitar o desenvolvimento de baterias com um custo mais baixo e uma maior eficiência.

Segundo indicado pela Agência Internacional de Energia *Technology Roadmap* [1], tendo como base a colaboração de governos internacionais e grupos industriais o crescimento de vendas de VEs terá uma rampa como se pode ver na figura 2-2.

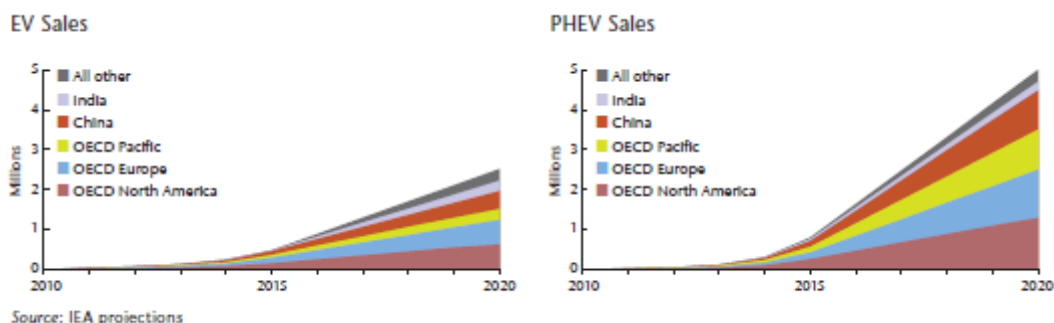


Figura 2-2 - Total de vendas por região até 2020.

Como podemos ver na tabela 2-1 retirada de [1] as previsões anunciadas para a venda de carros elétricos são bastante ambiciosas.

Tabela 2-1 - Anúncios de metas de vendas de VEs e PHVEs.

Países	Meta	Anúncio	Fonte
Suécia	2020 : 600 000	Maio 2009	<i>Nordic Energy Perspectives</i>
Suíça	2020 : 145 000	Julho 2009	<i>Alpiq Consulting</i>
Reino Unido	2020 : 1 200 000 stock VEs + 350 000 stock VEHPs 2030 : 3 300 000 stock VEs + 7 900 000 stock VEHPs	Outubro 2008	<i>Department for Transport "High Range" scenario</i>
Estados Unidos	2015: 1 000 000 VEHPs stock	Jan 2009	<i>President Barack Obama</i>
Estados Unidos	610 000 até 2015	8 Julho 2009	<i>Pike Research</i>
Outros países	2015: 1 700 000	8 Julho 2009	<i>Pike Research</i>
Outros países	2030: 5% to 10 % percentagem do mercado	Outubro 2008	<i>McKinsey & Co.</i>
Outros países	2020: 10 % percentagem do mercado	26 Junho 2009	<i>Carlos Ghosn, President, Renault</i>
Europa	2015: 250 000 VEs	4 Julho 2008	<i>Frost & Sullivan</i>
Europa	2015: 480 000 VEs	8 Maio 2009	<i>Frost & Sullivan</i>
Países Nórdicos	2020: 1 300 000	Maio 2009	<i>Nordic Energy Perspectives</i>

Podemos obter a taxa de alcance das metas de vendas, como é dito em [1], através de uma curva-s ao longo de uma sigmóide da seguinte forma:

$$\% \text{ da meta alcançada} = \frac{2}{(1 + e^{T-t})} \quad , \quad (2.1)$$

onde T é o período de início, neste caso 2010, e t o ano de meta do progresso.

A utilização em massa de VEs é um tema que tem revelado grande importância e por isso tem sido alvo de vários estudos. Em particular, olhemos para um estudo publicado pelo *English Department for Business Enterprise and Regulatory Reform* [2] em que demonstra a penetração de veículos eléctricos nas redes para alguns cenários, entre os quais:

- *Business as usual*, no qual os incentivos não sofrem alterações o que limitará o crescimento de utilizadores de VEs a áreas urbanas com maior intensidade de tráfego e consumidores preocupados com emissões de CO₂, o custo das baterias mantêm-se elevados assim como a capacidade limitada;
- *Mid-Range*, cenário em que os incentivos ambientais continuam a crescer com a taxa atual, os custos de vida de um VE são comparáveis a um veículo de MCI em 2015, o custo de venda e de manutenção de VEs são comparáveis aos veículos MCI mas as vendas são restritas a áreas urbanas;

- *High-range*, há uma intervenção significativa para incentivar as vendas de VEs, são criadas várias infraestruturas de carregamento em zonas urbanas, suburbanas e em algumas áreas rurais, os custos de vida de VEs são comparáveis com veículos MCI até 2015, com o carregamento de baterias de fácil obtenção;
- *Extreme Range*, assume que há um aumento significativo de VEs, com vendas restritas apenas a curto prazo pela disponibilidade de veículos, a longo prazo quase todas as vendas de veículos novos são VEs ou VEHPs.

Na tabela 2-2 podemos ver o número de carros vendidos no Reino Unido (RU), em cada cenário e para três anos:

Tabela 2-2 - Número VEs e VEHPs vendidos no Reino Unido.

	2010		2020		2030	
<i>Scenario</i>	VE	VEHP	VE	VEHP	VE	VEHP
<i>Business as Usual</i>	3000	1000	70000	200000	500000	2500000
<i>Mid-Range</i>	4000	1000	600000	20000	1600000	2500000
<i>High-Range</i>	4000	1000	1200000	350000	3300000	7900000
<i>Extreme Range</i>	4000	1000	2600000	500000	5800000	14800000

A percentagem de energia consumida para carregamento de VEs, face à energia total produzida, para os cenários apresentados pode ser vista na tabela 2-3.

Tabela 2-3 - Energia esperada para cada cenário.

	2010		2020		2030	
Capacidade de geração	79.9 GW		100 GW		120 GW	
Carga anual prevista para RU	380 TWh		360 TWh		390 TWh	
Carga para VEs	GWh	% of EP	GWh	% of EP	GWh	% of EP
<i>Business as Usual</i>	10	0.003	400	0.1	4200	1.1
<i>Mid-Range</i>	13	0.003	1800	0.5	6.700	1.7
<i>High-Range</i>	13	0.003	3.500	1.0	17.000	4.4
<i>Extreme Range</i>	13	0.003	7.400	2.0	31.000	7.9

EP = Energia total produzida no Reino Unido exceto a Irlanda do Norte

Segundo o plano apresentado no *Mayor's EV Delivery* [3], relativo à cidade de Londres, até 2015 deverão ser instalados 25000 pontos de carregamento espalhados por locais de trabalho, parques e zonas de estacionamento públicos. O tipo de carregamento deve ser adequado ao tempo de paragem no local, de modo a obter um carregamento mais eficiente ou seja num local onde o tempo de paragem seja pequeno, como zonas de paragem nas ruas, o carregamento deve ser rápido ao contrário de estacionamento em locais de trabalho onde o carregamento pode ser mais lento.

São definidos, então, três tipos de carregamento normalizado de cerca de 3KW (onde o carregamento é efetuado em cerca de 6 a 8 horas), pontos rápidos de 7 a 43KW (demora 1-2 horas) e pontos rápidos de 50 a 250KW (demora 10-20 minutos).

O número de pontos de carregamento esperados para cada tipo podem ser vistos na figura 2-3.

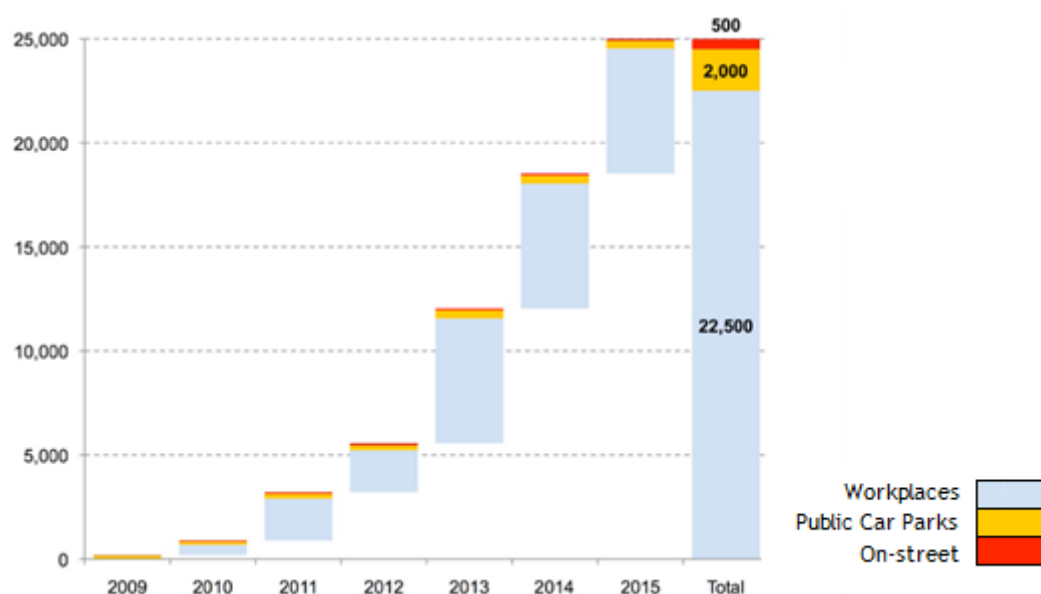


Figura 2-3 - Número de pontos de carregamento esperados.

Como podemos ver, as previsões são bastante otimistas para a introdução em massa de VEs nos próximos anos. Logo, para um bom planeamento a médio e longo prazo é importante um estudo do impacto dos VEs que forneça o acréscimo de carga devido à introdução de VEs.

Além do aumento aleatório de carga devido ao carregamento das baterias, podemos considerar outras estratégias de exploração ao introduzir VEs na rede elétrica. Como a percentagem de produção de energia elétrica através de energia renovável tem vindo a aumentar, há uma crescente preocupação em manter o sistema elétrico em equilíbrio. As fontes de energia renováveis são consideradas voláteis e o seu nível de produção bastante incerto, logo as previsões de produção de energia elétrica estão sujeitas a incertezas.

Em [4] são apresentadas estratégias de carregamento onde uma das estratégias apresentada é o conceito de Vehicle-to-Grid, onde a energia armazenada nas baterias dos VEs poderá ser utilizada na atuação dos controlos primário e secundário, para ajudar a estabilizar a rede caso ocorra alguma perturbação. Este conceito será viável com a ligação em massa de VEs à rede elétrica nesta política de carregamento uma vez que todos os VEs ligados a rede elétrica fornecem uma pequena percentagem da energia das baterias que no total deverá ser suficiente para estabilizar a rede.

Na figura 2-4, retirada de [5], podemos ver como o nível de energia armazenada nas baterias e como poderá variar se for necessário fornecer energia à rede.

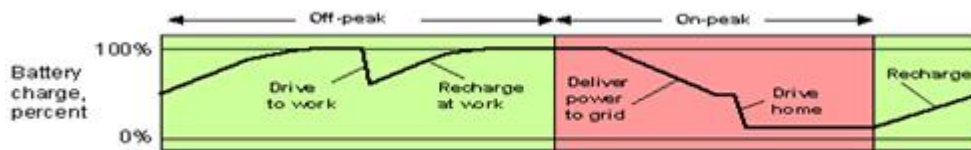


Figura 2-4 - Nível de energia na bateria.

A figura demonstra que o carregamento é separado em horas de vazio (*off-peak*) e horas cheias (*on-peak*) de forma a evidenciar como a energia armazenada nas baterias dos VEs pode ajudar no controlo primário ou secundário fornecendo energia à rede no modo *Deliver power to grid*. Será importante realçar que apesar de a bateria poder fornecer energia a rede deve manter sempre um nível de energia para a viagem de regresso a casa (*Drive Home*).

Como é dito em [6] para o carregamento das baterias podem ser adotados, dois métodos de carregamento: *dumb charging* e *smart charging*. Em *dumb charging* os proprietários são livres de carregarem as baterias sempre que quiserem, e o carregamento começa assim que forem conectados com a rede durante as quatro horas seguintes em média ou até serem desconectados. Em *smart charging* adota-se uma tarifação ativa inteligente onde há uma hierarquia de estrutura de controlo que monitoriza continuamente todos os elementos ligados à rede e o seu estado, fazendo um melhor uso de recursos energéticos disponíveis trabalhando simultaneamente com restrições da rede em cada momento evitando congestionamentos e elevadas quedas de tensão. Com a criação de incentivos económicos pode levar a que pelo menos 50% do carregamento dos VEs seja feito a partir da estrutura de controlo.

Na figura 2-5 retira de [6] podemos ver a carga necessária para as duas estratégias de carregamento apresentadas.

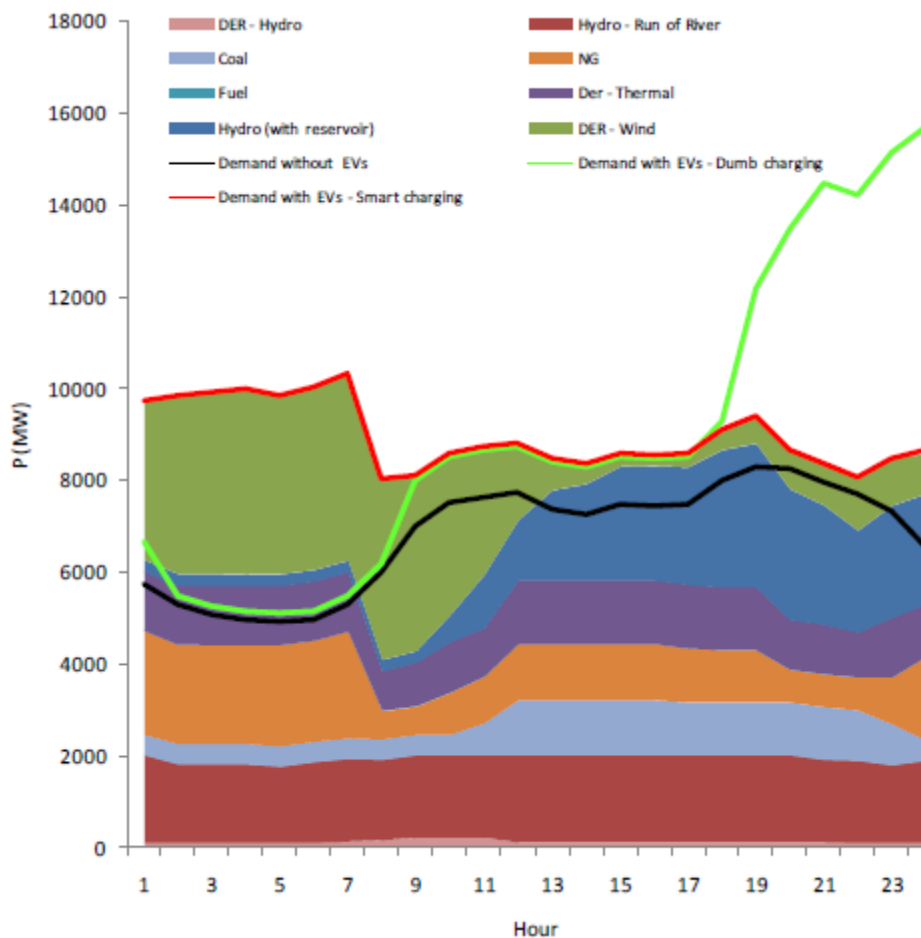


Figura 2-5 - Geração para o sistema elétrico português previsto com 61% de VEs.

Neste estudo podemos ver que o nível de carga, ao longo do dia, com *smart charging* permite o aproveitamento da energia elétrica em excesso proveniente de centrais renováveis em horas de vazio. Com *dumb charging* o mesmo não acontece podendo apresentar valores elevados de consumo em horas de cheias que obriga à utilização menos eficiente das centrais de energia. Na carga consumida em *dumb charging* temos um aumento elevado a partir da hora 19 que pode levar à perda de segurança do sistema. Podemos ver que esta hora coincide com a cheia do consumo sem VEs.

Em [7] são mencionadas as estratégias descritas anteriormente e uma outra estratégia *dual tariff policy* onde são criados horários onde o carregamento é mais barato. Este horário é acordado entre o cliente e o agente distribuidor mas em Portugal supõe-se que este período ocorra entre as 23 e as 8 horas do dia seguinte, as previsões indicam que 25% dos carregamentos dos VEs passem para os horários em que fica mais económico.

Deste modo o carregamento das baterias poderá ser mais acentuado durante a noite, período onde chega a haver energia a mais na rede, a energia obtida através de fontes voláteis pode ser aproveitada de forma mais eficiente e evita níveis carga demasiado elevados nas horas de cheias.

A figura 2-6 mostra a carga consumida para as três estratégias ao longo de um dia.

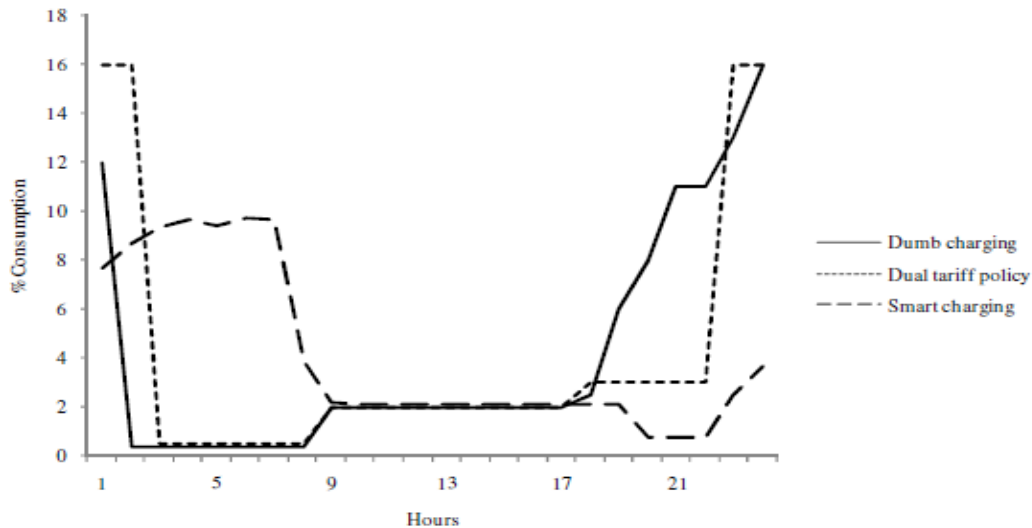


Figura 2-6 - Comparação entre as três estratégias de carregamento.

Observando a figura vemos que o consumo de energia para as diferentes estratégias de carregamento pode oscilar acentuadamente ao longo do dia sendo o *smart charging* o que tem um comportamento mais aceitável, seguindo-se o *dual tariff policy*. No entanto, como a autonomia dos VEs ainda apresenta um nível baixo, a probabilidade de ocorrência dos três cenários será grande, pelo que deverão ser considerados para estudos de planejamento e exploração.

Apesar das previsões de desenvolvimento dos VEs e da sua comercialização a previsão do nível de carga dos VEs apresentará muitas incertezas, uma vez que podem ser aplicadas diferentes estratégias de carregamento das baterias de VEs.

2.2 - Trânsito de Potências Determinístico

Uma forma de cálculo de trânsito de potências é através de métodos determinísticos convencionais onde podemos destacar o modelo DC e o trânsito de potências AC. Em [8], pode-se encontrar algumas considerações gerais necessárias para a análise de trânsito de potências.

Para realizar o cálculo do trânsito de potências pode-se considerar apenas dois tipos de elementos: barramentos e ramos. Aos barramentos associamos geradores e cargas, onde é conhecida a potência produzida e a potência da carga ou consumida, à exceção do barramento de compensação onde não é conhecida a produção. Aos ramos associamos linhas de transmissão, transformadores e baterias de condensadores onde conhecemos os seus parâmetros característicos e modelos equivalentes. Para os ramos consideramos que a sua impedância (z_{ik}) é dada pela seguinte expressão:

$$z_{ik} = r_{ik} + jx_{ik} \quad , \quad (2.2)$$

onde r_{ik} é a resistência e x_{ik} a reactância no ramo.

A admitância shunt por:

$$y_{shik} = j \frac{b_{ik}}{2} \quad (2.3)$$

Para linhas todos parâmetros deverão ser diferentes de zero, para transformadores $r_{ik} = 0$ e $b = 0$, para baterias de condensadores $r_{ik} = 0$ e $x_{ik} = 0$.

O valor do trânsito de potência ativa e reativa são, em ambos os métodos, dadas pelas seguintes expressões, respetivamente:

$$P_{ik} = \frac{1}{r_{ik}^2 \times x_{ik}^2} [r_{ik} \times V_i^2 - r_{ik} \times V_i \times V_k \cos \theta_{ik} + x_{ik} \times V_i \times V_k \sin \theta_{ik}] \quad (2.4)$$

$$Q_{ik} = \frac{1}{r_{ik}^2 \times x_{ik}^2} [x_{ik} \times V_i^2 - x_{ik} \times V_i \times V_k \cos \theta_{ik} - r_{ik} \times V_i \times V_k \sin \theta_{ik}] - \frac{b_{ik}}{2} \times V_i^2 \quad , \quad (2.5)$$

V_i e V_k será o módulo da tensão no barramento i e k, respectivamente, θ_{ik} o desfasamento da tensão entre os barramentos i e k.

As perdas podem ser calculadas somando o trânsito nos ramos em ambos os sentidos:

$$p = P_{ik} + P_{ki} \quad (2.6)$$

$$q = Q_{ik} + Q_{ki} \quad (2.7)$$

2.2.1 - Modelo DC

No modelo DC, apresentado em [8], são consideradas algumas aproximações entre as quais:

$$r_{ik} = 0 \quad (2.8)$$

e

$$b = 0 \quad (2.9)$$

Construímos então a matriz das admitâncias B de dimensão nxn, onde n será o número de barramentos:

$$B_{ik} = -\frac{1}{x_{ik}}, \text{ para } i \neq k \quad \text{e} \quad B_{ii} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_{ik}}, \text{ com } k \neq i \quad (2.10 \text{ e } 2.11)$$

De seguida eliminando a linha e a coluna correspondente ao barramento de compensação e obtemos a matriz B' de dimensão (n-1)x(n-1), a qual invertamos de modo a obter a matriz das impedâncias Z':

$$Z' = B'^{-1} \quad (2.12)$$

Depois de calcularmos as potências ativas injetadas em cada barramento pela expressão:

$$P_i = P_g - P_c \quad (2.13)$$

onde P_g será a potência activa gerada e P_c será a potência activa consumida no barramento em causa.

Com o valor da potência injetada em cada barramento, à exceção do barramento de compensação, podemos agora calcular os desfasamentos das tensões em relação ao barramento de referência que será o escolhido para barramento de compensação:

$$\theta_i = Z' \times P_i \quad (2.14)$$

como em radianos: $\text{sen}\theta_{ik} \cong \theta_i - \theta_k \quad (2.15)$

e a tensão em qualquer barramento: $V_i \cong 1 \text{ p.u.} \quad (2.16)$

Considerando todas as aproximações anteriores temos as seguintes expressões para o cálculo de trânsito de potência nos ramos:

$$P_{ik} = \frac{\theta_i - \theta_k}{x_{ik}} = -P_{ki} \quad (2.17)$$

$$Q_{ik} = Q_{ki} = 0 \quad (2.18)$$

Uma outra forma de calcular a potência nos ramos é através da matriz das sensibilidades A , que não necessita de conhecer o valor dos desfasamentos das tensões, dada pela seguinte expressão:

$$A_{(i-k),j} = \frac{Z'_{ij} - Z'_{kj}}{X_{ik}} \quad (2.19)$$

$$P_{ik} = A \times P_i = -P_{ki} \quad (2.20)$$

O modelo DC é de fácil execução e conseqüentemente oferece resultados num espaço de tempo muito reduzido. Infelizmente como são consideradas muitas aproximações não é possível obter alguns resultados como perdas e o trânsito de potência reativa, que são considerados nulas. Neste método também não é possível saber ao certo o módulo das tensões pois são considerados iguais a um.

Para um estudo mais detalhado e exato o modelo DC não será a melhor opção pois não fornece o valor de todas as variáveis necessárias, mas para uma primeira abordagem de uma rede, fornece com pouco esforço matemático uma ideia do comportamento dessa mesma rede.

2.2.2 - Trânsito de potências AC

Para o cálculo de Trânsito de potências AC um método bastante utilizado será algoritmo apresentado em [9] o método de Newton-Raphson.

Ao contrário do que acontece no modelo DC, é necessário considerar todas as características eléctricas dos ramos para a construção da matriz das admitâncias nodais Y como se pode ver na expressão:

$$Y_{ik} = -\frac{1}{z_{ik}}, \text{ para } i \neq k \quad \text{e} \quad Y_{ii} = \sum_{k=1}^n \left[\frac{1}{z_{ik}} + j \frac{b_{ik}}{2} \right], \text{ com } k \neq i \quad (2.21 \text{ e } 2.22)$$

Decompondo a matriz das admitâncias nodais Y em parte real e parte imaginária obtemos duas sub-matrizes G e B respetivamente, necessárias para os cálculos intermédios.

$$G_{ik} = \text{Real}\{Y_{ik}\} \quad e \quad B_{ik} = \text{Im}g\{Y_{ik}\} \quad (2.23 \text{ e } 2.24)$$

Logo de início é necessário classificar o tipo de barramentos. Nos barramentos PV são conhecidos a potência ativa e módulo da tensão e serão calculados o módulo da tensão e a potência reativa. Nos barramentos PQ são conhecidas as potências ativas e reativas e calculamos os argumentos e módulos das tensões. No barramento de compensação e referência são conhecidos o argumento e módulo da tensão e calculamos o valor da potência ativa e reativa. Depois de classificar os barramentos teremos n barramentos PV, m barramentos PQ e um barramento de compensação e referência.

O método de Newton-Raphson baseia-se numa repetição de iterações até encontrar uma solução que satisfaça uma condição.

A condição a verificar no algoritmo será:

$$\max\{|\Delta P| \text{ ou } |\Delta Q|\} < \varepsilon \quad , \quad (2.25)$$

onde $|\Delta P|$ e $|\Delta Q|$ são obtemos da seguinte forma:

$$|\Delta P| = P_i^{esp} - P_i^{calc} \quad (2.26)$$

$$|\Delta Q| = Q_i^{esp} - Q_i^{calc} \quad (2.27)$$

Para calcular os novos P_i e Q_i recorreremos as expressões:

$$P_i = V_i \times \sum_{k=1}^{n+m} V_k \times (G_{ik} \times \cos\theta_{ik} + B_{ik} \times \sin\theta_{ik}) \quad (2.28)$$

$$Q_i = V_i \times \sum_{k=1}^{n+m} V_k \times (G_{ik} \times \sin\theta_{ik} - B_{ik} \times \cos\theta_{ik}) \quad (2.29)$$

Nestes cálculos intermédios, para os barramentos em que não são conhecidos os valores dos módulos e dos argumentos das tensões, considera-se, para valores iniciais, por norma zero para o argumento da tensão e 1p.u. para o módulo, no caso de redes pequenas pode-se considerar o valor inicial do módulo igual ao do barramento de compensação.

Caso não se verifique a condição (2.25), será necessário calcular um novo módulo de tensão para os barramentos PQ e um novo valor do argumento nos barramentos PQ e PV.

Para atualizar os módulos e argumentos da tensão, recorreremos à matriz Jacobiano dada pelas expressões:

Para $i \neq k$:

$$H_{ik} = L_{ik} = V_i \times V_k \times (G_{ik} \times \sin\theta_{ik} - B_{ik} \times \cos\theta_{ik}) \quad (2.30)$$

$$N_{ik} = -M_{ik} = V_i \times V_k \times (G_{ik} \times \cos\theta_{ik} - B_{ik} \times \sin\theta_{ik}) \quad (2.31)$$

Para $i = k$:

$$H_{ii} = -B_{ii} \times V_i^2 - Q_i \quad (2.32)$$

$$L_{ii} = -B_{ii} \times V_i^2 + Q_i \quad (2.33)$$

$$M_{ii} = -G_{ii} \times V_i^2 + Q_i \quad (2.34)$$

$$N_{ii} = G_{ii} \times V_i^2 + Q_i \quad (2.35)$$

A matriz Jacobiano é construída da seguinte forma:

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

O cálculo dos novos valores dos argumentos e módulos da tensão são calculados invertendo a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Com os novos valores dos argumentos e módulos da tensão, calculamos os novos valores de $|\Delta P|$ e $|\Delta Q|$ até se verificar a condição (2.25). Assim que esta se verifique, é possível calcular o valor de Q_i para os barramentos PV e assim obter P_i e Q_i para o barramento de compensação.

A figura 2-7 contém um fluxograma com o método de Newton-Raphson de modo a ajudar e entender melhor a sequência do algoritmo.

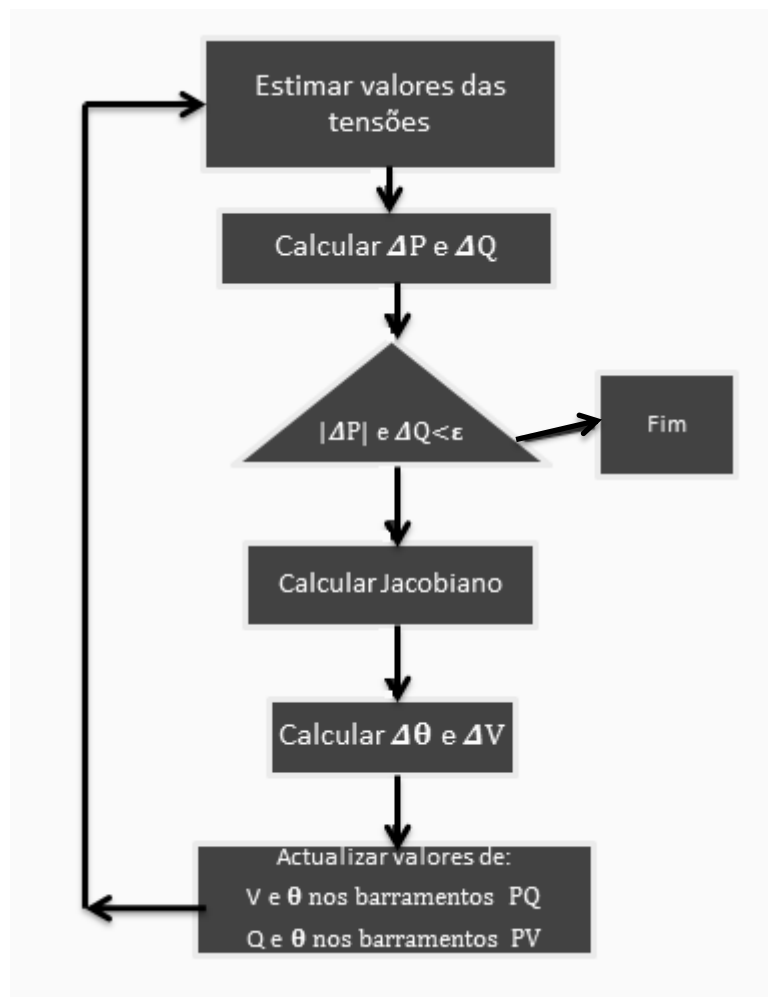


Figura 2-7- Fluxograma do processo iterativo do método de Newton-Raphson.

Por fim, através das expressões (2.4) e (2.5) é possível calcular o trânsito de potências ativa e reativa nos ramos, assim como as respectivas perdas, através das expressões (2.6) e (2.7).

O método de Newton-Raphson é um método mais completo do que o modelo DC, demonstra de uma maneira mais detalhada o comportamento da rede para uma dada carga conhecida e produção atribuída. Com o método de Newton-Raphson conseguimos saber o valor exato dos módulos e argumentos das tensões nos barramentos, o que pode dar ideia da melhor localização das baterias de condensadores assim como conseguimos obter o valor das perdas nos ramos tanto de potência ativa como de potência reativa.

Mas, apesar de toda a sua complexidade, é um método que nos dá o comportamento da rede para um nível exato de carga e um nível exato de produção à exceção do barramento de compensação que terão sempre limitações.

Hoje em dia, com um nível de produção de energia elétrica, a partir de fontes renováveis voláteis, e com a entrada de VEs, é necessário adotar métodos para cálculo de trânsitos de potências que melhor representem as incertezas nas potências nodais.

2.3 - Considerando Incertezas no Trânsito de Potências

Com a evolução da complexidade do sistema elétrico, a liberalização de mercados energéticos e a introdução de fontes de energia voláteis, as incertezas associadas ao sistema elétrico têm vindo cada vez mais a acentuarem-se. O estudo e planeamento das condições de operação do sistema com base em métodos determinísticos convencionais deixou de ser uma ferramenta que oferece resultados com veracidade. Como é referido em [11] os métodos de ajuste de produção transporte e carga também se foram ajustando a essas incertezas e tornando-se mais rigorosos de forma a oferecer melhores resultados.

As incertezas num trânsito de potências podem ser consideradas representando os dados do sistema como um conjunto de números. De seguida iremos apresentar duas formas de representar essas incertezas, representando os dados do sistema por funções de densidade de probabilidade ou em números difusos.

2.3.1 - Trânsito de potências Probabilístico

Como já foi mencionado as incertezas podem ser representadas de forma probabilística, como é dito em [11], [12] e [13] para termos uma boa representação das incertezas a potência das cargas são representadas por densidades de probabilidade Normal em que a média e o desvio padrão são dados.

Os dados necessários para o cálculo de um trânsito de potências probabilístico, tal como num trânsito de potências AC, são as potências ativas nos barramentos PV e PQ, potências reativas nos barramentos PQ, tensões nos barramentos PV e referência.

Na figura 2-8 estão representadas densidades de probabilidade Normal com média e desvio padrão diferente.

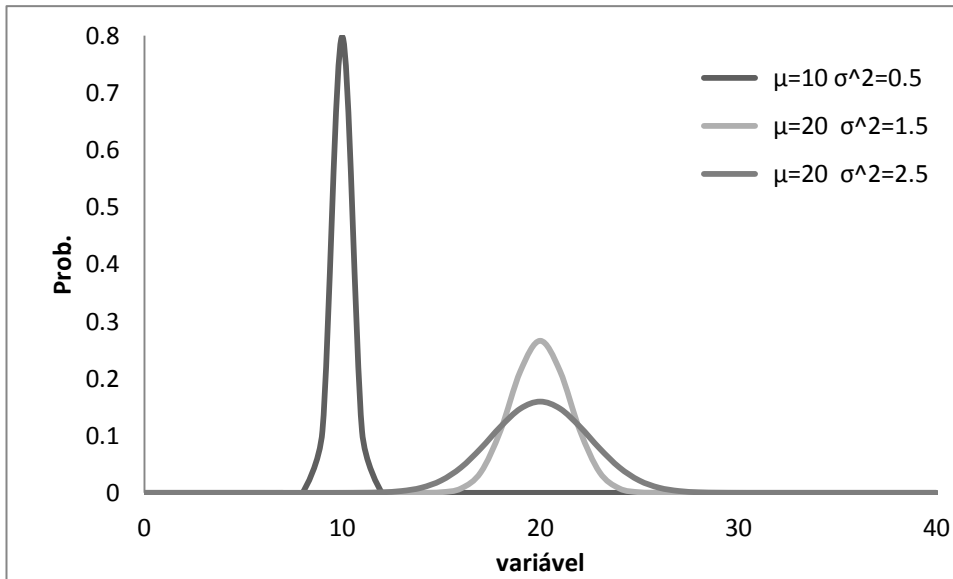


Figura 2-8- Função de densidade de probabilidade Normal com médias e desvios padrões diferentes.

É possível ver que quanto maior o desvio padrão mais atenuada será a forma da função e por consequência menos concentrada junto da média o que nos diz que a variável apresenta um nível elevado de incertezas.

Em [13] vemos que a potência nas centrais produtoras deve ser representada por funções de densidades de probabilidade Discreta, onde o valor esperado é dado por $\mu = \sum_{i=1}^m x_i p_i$, e o desvio padrão por $\sigma_i^2 = \sum_{i=1}^m (x_i - \mu) \times p_i$, m será o número de valores discretos. Em casos em que as centrais são constituídas por conjuntos de geradores iguais podem ser representadas por densidades de probabilidade binomiais e neste caso o valor esperado $\mu = n(1 - q)R$ sendo n o número de geradores, q a taxa de saída de serviço e R a potência de cada gerador, e o desvio padrão por $\sigma_i^2 = nq(1 - q)R^2$, onde n será o número de valores discretos.

Na figura 2-8 temos representada uma densidade de probabilidade Discreta.

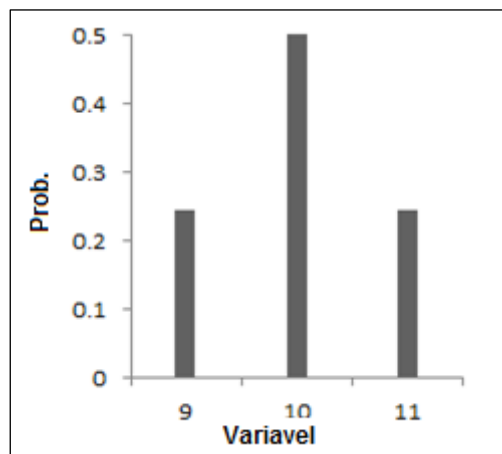


Figura 2-9 - Função densidade de probabilidade Discreta.

Os valores apresentados na figura são respetivamente, no eixo horizontal, o valor da variável e, no eixo vertical, a probabilidade de ocorrência.

Geralmente as funções de densidade de probabilidade para as centrais geradoras são representadas por funções de densidade discreta pois são representadas pela taxa de interrupção forçada ou *FOR*.

Os trânsitos de potência nos ramos poderão ser ou não densidades de distribuição com forma de uma normal devido à não linearidade das equações do trânsito de potências e à dependência entre variáveis que é desprezada.

No capítulo seguinte teremos uma explicação mais detalhada das metodologias utilizadas para o cálculo de um trânsito de potências probabilístico.

2.3.2 - Trânsito de potências *Fuzzy*

Num trânsito de potências *fuzzy* (ou difuso) as variáveis são representadas com intervalos em que as variáveis podem assumir mais do que um valor. Em geral os números *fuzzy* podem assumir formas como triângulos, trapézios e retângulos. Esta forma de representação deve-se as incertezas do sistema.

Tal como noutros métodos de cálculo de trânsito de potências, com números *fuzzy* é possível adotar simplificações semelhantes ao modelo DC convencional que dará uma solução rápida mas limitada nas variáveis que é possível calcular. Também é possível adotar uma metodologia semelhante ao trânsito de potências AC que já nos fornece a variáveis pretendidas do sistema.

Em [10] são expostos os seguintes métodos para o trânsito de potências *fuzzy*.

Modelo DC

Tal como no modelo DC convencional, só é possível calcular o trânsito de potência ativa e os ângulos das tensões. As simplificações dadas para o Modelo DC convencional mantêm-se para o trânsito de potências *fuzzy*.

Para dar início ao algoritmo é necessário calcular um trânsito de potências determinístico para os valores centrais da potência. Com os valores centrais das variáveis, é possível calcular os desvios da potência injetada da seguinte forma:

$$[\Delta\tilde{P}] = [\tilde{P}] - [P^{ctr}] \quad (2.38)$$

Da mesma forma como se calcula os desfasamentos para o método convencional, aqui podemos calcular os desvios dos desfasamentos:

$$[\Delta\tilde{\theta}] = [B]^{-1} \times [\Delta\tilde{P}] \quad (2.39)$$

Para calcular os desvios dos trânsitos nas linhas, aplica-se a seguinte expressão:

$$[\Delta\tilde{P}_{ik}] = [A] \times [\Delta\tilde{P}] \quad (2.40)$$

Com os desvios das potências e fases das tensões pode-se calcular os valores *fuzzy* somando o valor central aos desvios:

$$[\tilde{\theta}] = [\theta^{ctr}] + [\Delta\tilde{\theta}] \quad (2.41)$$

$$[\tilde{P}_{ik}] = [P_{ik}^{ctr}] + [\Delta\tilde{P}_{ik}] \quad (2.42)$$

O desvio da potência ativa no barramento de referência obtém-se através do somatório dos desvios das potências geradas nos outros barramentos e do somatório dos desvios das potências consumidas em todos os barramentos:

$$[\Delta \widetilde{P}g_{nb}] = \sum_{k=1}^{nb} [\Delta \widetilde{P}c_k] \odot \sum_{k=1}^{nb-1} [\Delta \widetilde{P}g_k] \quad (2.43)$$

onde nb é o número total de barramentos e tal como nos trânsitos nos ramos a potência no barramento de referência a é dada por:

$$[\widetilde{P}g_{nb}] = [Pg_{nb}^{ctr}] + [\Delta \widetilde{P}g_{nb}] \quad (2.44)$$

Modelo AC

Da mesma forma como no modelo DC foi necessário um trânsito determinístico para os valores centrais das potências, aqui também será necessário, para nos dar os valores centrais das seguintes variáveis:

- Tensões e fases nos barramentos;
- Matriz Jacobiano para os valores centrais;
- Potências ativas e reativas injetadas;
- Trânsito de potências ativas e reativas.

Para dar continuidade ao algoritmo é necessário linearizar, em torno do ponto de central, as expressões dos trânsitos de potência.

O trânsito determinístico dá-nos os valores centrais pela expressão:

$$[X^{ctr}] = [J]^{-1} \times [Y^{ctr}] \quad (2.45)$$

onde $[J]^{-1}$ é a matriz das sensibilidades para o valor central.

De seguida o cálculo dos desvios das potências injetadas:

$$[\Delta \widetilde{Y}] = [\widetilde{Y}] \times [Y^{ctr}] \quad (2.46)$$

Com os desvios das potências injetadas calcula-se os desvios das tensões pela expressão:

$$[\Delta \widetilde{X}] = [J]^{-1} \times [\Delta \widetilde{Y}] \quad (2.47)$$

os valores fuzzy das tensões dados pela expressão seguinte, sujeitos á aritmética *fuzzy*:

$$[\widetilde{X}] = [X^{ctr}] + [\Delta \widetilde{X}] \quad (2.48)$$

Os desvios dos trânsitos de potências, devem ser calculados em ordem aos desvios das potências injetadas.

$$\Delta P_{ik} = \frac{\partial P_{ik}}{\partial V_i} \times \Delta V_i + \frac{\partial P_{ik}}{\partial V_k} \times \Delta V_k + \frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_i} \times \Delta \theta_i + \frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_k} \times \Delta \theta_k \quad (2.49)$$

$$\Delta Q_{ik} = \frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_i} \times \Delta V_i + \frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_k} \times \Delta V_k + \frac{\partial Q_{ik}}{\partial \theta_i} \times \Delta \theta_i + \frac{\partial Q_{ik}}{\partial \theta_k} \times \Delta \theta_k \quad (2.50)$$

De uma forma geral os trânsitos numa linha será dado por:

$$\Delta P_{ik} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_{ik}}{\partial V_i} & \frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{ik}}{\partial V_k} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [J^{-1}]_i^\theta \\ [J^{-1}]_i^V \\ [J^{-1}]_k^\theta \\ [J^{-1}]_k^V \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

$$\Delta Q_{jk} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{ik}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_{ik}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_k} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [J^{-1}]_i^\theta \\ [J^{-1}]_i^V \\ [J^{-1}]_k^\theta \\ [J^{-1}]_k^V \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

As express es para as derivadas parciais dos tr nsitos de pot ncia ativa:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{ik}}{\partial V_i} &= -2 \times G_{ik} \times V_i + V_k \times (G_{ik} \times \cos \theta_{ik} + B_{ik} \times \sin \theta_{ik}) \\ \frac{\partial P_{ik}}{\partial V_k} &= V_i \times (G_{ik} \times \cos \theta_{ik} + B_{ik} \times \sin \theta_{ik}) \\ \frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_i} &= V_i \times V_k \times (-G_{ik} \times \sin \theta_{ik} + B_{ik} \times \cos \theta_{ik}) \\ \frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_k} &= -\frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_i} \end{aligned}$$

As express es para as derivadas parciais dos trânsitos de potência reativa:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_i} &= 2 \times V_i \times B_{ik} + V_k \times (G_{ik} \times \sin \theta_{ik} - B_{ik} \times \cos \theta_{ik}) \\ \frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_k} &= V_i \times (G_{ik} \times \sin \theta_{ik} - B_{ik} \times \cos \theta_{ik}) \\ \frac{\partial Q_{ik}}{\partial \theta_i} &= V_i \times V_k \times (G_{ik} \times \cos \theta_{ik} + B_{ik} \times \sin \theta_{ik}) \\ \frac{\partial Q_{ik}}{\partial \theta_k} &= -\frac{\partial Q_{ik}}{\partial \theta_i} \end{aligned}$$

Ao linearizar os trânsitos de potências, produ es, perdas, correntes, etc, uma nova matriz de sensibilidades   obtida para cada variável no caso do trânsito de ativa numa linha será a seguinte:

$$[A_{P_{ij}}^{-1}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_{ik}}{\partial V_i} & \frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{ik}}{\partial V_k} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [J^{-1}]_{i\theta} \\ [J^{-1}]_{iV} \\ [J^{-1}]_{k\theta} \\ [J^{-1}]_{kV} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

Apesar de não representar de modo tão significativo as incertezas de geração dos consumos de energia quando comparado com trânsito de potências probabilístico, o trânsito de potências fuzzy apresenta um esforço computacional menor.

Capítulo 3

Metodologias do Trânsito de Potências Probabilístico

Neste capítulo serão apresentadas, com algum pormenor, algumas metodologias para o cálculo do trânsito de potências probabilístico, assim como algumas ferramentas necessárias para a sua execução. Adicionalmente será justificada através de uma discussão teórica qual a melhor metodologia de trânsito de potências probabilístico para a representação da incerteza oriunda da carga dos veículos eléctricos. Com o objectivo de demonstrar alguns detalhes relacionados com as propriedades de cada metodologia, uma discussão com base num sistema teste pequeno e controlado será proposta, evidenciando aspectos importantes da consideração de incertezas em trânsito de potências. O transitio de potência probabilístico desenvolvido foi escrito em linguagem Java, para ser incorporado a plataforma jPowerFlow.

Em geral pode-se dizer que existem várias metodologias para calcular um trânsito de potências probabilístico. Estas metodologias podem-se dividir em dois conjuntos: metodologias analíticas e metodologias numéricas.

3.1 - Metodologias Analíticas

Apesar das metodologias utilizarem algoritmos diferentes, existem duas expressões que podemos considerar iguais para qualquer das metodologias apresentadas a seguir, que serão:

$$Y = g(X) \quad (3.1)$$

$$Z = h(X) \quad (3.2)$$

onde Y são os dados do sistema, potências ativas dos barramentos PV e PQ e potências reativas nos barramentos PQ, X serão os desfasamentos e módulos das tensões nos barramentos, Z são as incógnitas que pretendemos obter tais como trânsitos e perdas nas linhas, potências activa e reactiva no barramento de compensação e referência, potência reativa nos barramentos PV.

Como é referido em [12] no cálculo de um trânsito de potências probabilístico é necessário ter em conta algumas considerações:

- as variáveis são consideradas independentes;
- os trânsitos das linhas são linearizados com as potências dos nós adjacentes;

- a compensação das perdas é feita no barramento de compensação e referência;
- a topologia da rede mantém-se inalterável, em cada cálculo do trânsito de potências.

Tal como nos métodos determinísticos convencionais é necessário calcular a matriz das admitâncias nodais Y a partir das expressões (2.21 e 2.22) apresentadas no capítulo anterior.

O modelo DC apresentado no capítulo anterior com exceção da expressão (2.17) e aplicando as ferramentas adequadas para o seu cálculo em especial no que diz respeito a convolução de funções, pode ser utilizado para obter um Trânsito de potências probabilístico. Mas tal como na abordagem convencional, apesar de ser de rápida execução quando comparado com outros métodos, as soluções obtidas são limitadas devido às simplificações.

As expressões iniciais para o cálculo das potências injetadas nos barramentos, potências e perdas nos ramos são as mesmas apresentadas para o Trânsito de potências AC apresentado no capítulo anterior.

3.1.1 Método linear

Para conseguir obter os valores de X , inverte-se a expressão (3.1) e como as variáveis são consideradas independentes é necessário obter X_i em função de Y_i tendo assim a expressão para o cálculo de X :

$$X = \hat{X} + A(Y - \hat{Y}) \quad (3.3)$$

onde A é calculado pela seguinte expressão:

$$A = \left(\frac{\partial g}{\partial X_{|\hat{X}}} \right)^{-1} \quad (3.4)$$

(\hat{X}, \hat{Y}) será o ponto de linearização e \hat{Y} o valor das potências do valor esperado. Para calcular a matriz A (matriz inversa da Jacobiana) no ponto (\hat{X}, \hat{Y}) , pode-se recorrer ao algoritmo de Newton-Raphson. A linearização no ponto (\hat{X}, \hat{Y}) é obtida a partir da expansão da série de Taylor de primeira ordem. Em [12] é mencionado que a expansão de Taylor de segunda ordem não é relevante para cargas com incertezas pequenas, logo será desprezada neste método.

As soluções do sistema são obtidas através da linearização da expressão (3.2) obtendo assim a expressão:

$$Z = \hat{Z} + B(Y - \hat{Y}) \quad (3.5)$$

onde B é calculado pela seguinte expressão:

$$B = \left(\frac{\partial h}{\partial X_{|\hat{X}}} \right)^{-1} \times A \quad (3.6)$$

O calculo das equações (3.3) e (3.5) são obtidos aplicando técnicas de convolução, a escolha da Transformada Rápida de Fourier (TRF) é justificada a baixo.

3.1.2 Boundary Load Flow (BLF)

Este novo algoritmo como se pode ver em [14] no início é bastante semelhante ao modelo linear, a diferença está em como as funções de densidade Normais são truncadas assim como os limites das soluções obtidas a partir de um novo ponto de linearização.

Começa-se por linearizar no ponto (X_0, Y_0) que será o ponto do valor esperado, com o algoritmo de Newton-Raphson conseguimos obter a matriz A necessária. Assim com a expressão (3.3) podemos obter as tensões. A solução obtida é bastante próxima do valor real próximo de (X_0, Y_0) , para pontos mais afastados são acrescidos erros resultantes da linearização.

Este algoritmo tem como objetivo inicial definir os limites para as soluções obtidas tais como módulo e ângulos das tensões.

Para obter os limites das soluções primeiro é necessário definir os limites das funções de Y . Nas funções de densidade de distribuição Discretas é bastante simples uma vez que as funções usadas para representar centrais geradoras já são funções limitadas, mas para o caso de funções de densidade de probabilidade Normais o mesmo não acontece pois tendem para $\pm\infty$ logo ao serem truncadas como é dito em [14] podem ser desprezados valores significativos. Uma forma de truncar cada função de densidade de probabilidade Normal é através do seguinte fator α calculado pela seguinte expressão:

$$\alpha = 3 \times \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^r \sigma_j^2}}{\sum_{j=1}^r \sigma_j} \quad (3.7)$$

onde r será o número de distribuições afetadas pela convolução.

Deste modo, os limites para cada função densidade de probabilidade será:

$$\{-\alpha\sigma_j; \alpha\sigma_j\} \quad (3.8)$$

Se for considerado o mesmo factor α em todas as funções, a mesma porção de informação será perdida para todas as funções densidade de probabilidade Normais. O fator α deve ser calculado em cada iteração e no fim deverá convergir para um valor menor ou igual a 3.

Deste modo, obtêm-se os limites das funções densidade de probabilidade de entrada e de seguida calcula-se o valor máximo de cada X_i manipulando a expressão (3.3):

$$\text{Max } X_i = X_{0i} + \sum_{j=1}^m a_{ij} (Y_{Lj} - Y_{0j}) \quad (3.9)$$

onde m é a dimensão do vector Y , a_{ij} são coeficientes da matriz A obtida pela linearização em Y_0 . O valor de Y_L será o valor máximo ou mínimo de Y_{Lj} conforme o sinal, positivo ou negativo respetivamente, de a_{ij} , de modo a proporcionar o valor máximo X_i . Os valores máximos e mínimos serão os extremos das funções densidade de probabilidade Normais depois de truncadas e discretizadas.

Para cada X_i será associado um vector Y_L com o qual será calculado todo o vector X_M de modo a maximizar X_i com estes novos valores de tensão e do respetivo desfasamento podemos calcular as potências injetadas pelas expressões (2.4) e (2.5) obtendo um ponto de

funcionamento. Aplicando um método determinístico obtemos uma nova matriz de sensibilidades e assim é de novo calculado um novo vetor X_M . Este processo é repetido até que ΔX_i seja menor que uma tolerância atribuída, e repetido para cada X_i . Para cada variável de estado, X_i , é atribuída uma matriz de sensibilidades que será a matriz para o cálculo da solução de X_i com o valor máximo como ponto de linearização.

No processo de cálculo dos extremos das tensões e trânsitos de potência podem-se verificar problemas de convergência. Em [14] é dito que se o grau de não-linearidade das equações de trânsito de potências não for grande os coeficientes de sensibilidade não mudam de sinal entre iterações, logo o processo converge usando sempre os mesmos valores de Y_L .

Contudo, no cálculo de alguns módulos de tensões ou trânsito de reativa, o coeficiente de sensibilidade associado a Y_j pode mudar de sinal de iteração para iteração. Ou seja para o cálculo de um máximo:

$$a^1 = \begin{bmatrix} a_1 > 0 \\ a_2 < 0 \\ a_3 > 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$Y_L^1 = [Y_{1max} \quad Y_{2min} \quad Y_{3max}] \quad (3.11)$$

$$a^2 = \begin{bmatrix} a_1 > 0 \\ a_2 > 0 \\ a_3 > 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$Y_L^2 = [Y_{1max} \quad Y_{2max} \quad Y_{3max}] \quad (3.13)$$

$$a^3 = \begin{bmatrix} a_1 > 0 \\ a_2 < 0 \\ a_3 > 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$Y_L^3 = [Y_{1max} \quad Y_{2min} \quad Y_{3max}] \quad (3.15)$$

Se o valor de $a_{ij} \times Y_{Lj}$ for desprezável o processo continua a convergir, caso contrário não é possível saber qual valor extremo de Y_j que deve contribuir para o extremo a calcular, fazendo com que o algoritmo não convirja, o que demonstra um grau elevado de não-linearidade de algumas variáveis.

Caso ao fim três iterações o sinal do coeficiente de sensibilidade continue a oscilar, uma forma de solucionar este problema será utilizar-se um valor intermédio de Y_j ou o valor esperado, de modo a que o cálculo dos extremos convirja.

A figura 3-1 contem o fluxograma retirado de [15] o processo iterativo para o cálculo dos valores extremos das variáveis de estado.

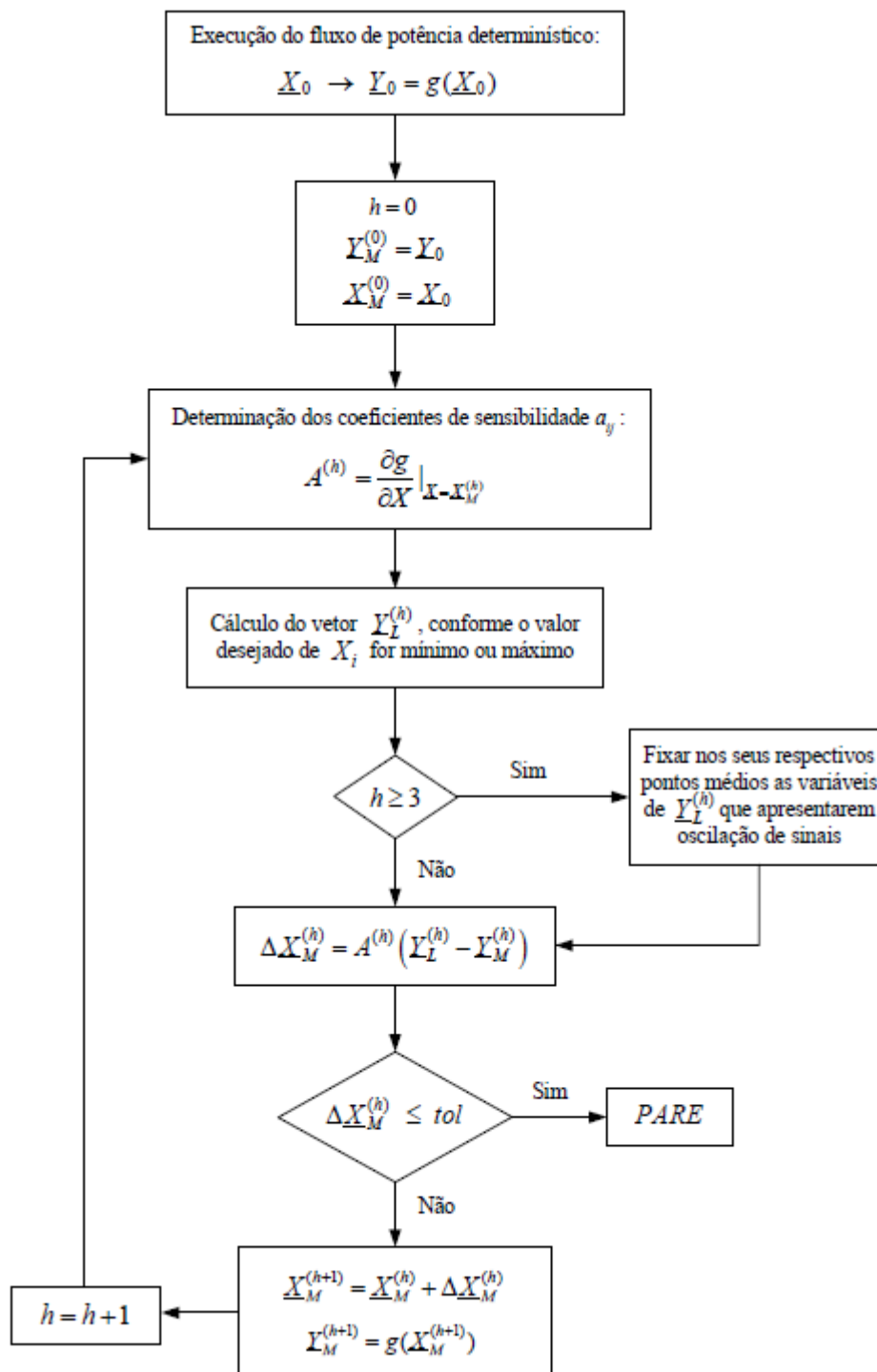


Figura 3-1- Fluxograma BLF para as variáveis de estado.

Para calcular o mínimo de X_i a expressão será a mesma dada para o valor máximo mas agora o valor de Y_L será o valor mínimo ou máximo de Y_{Lj} , novamente, conforme o sinal de a_{ij} , de modo a proporcionar o mínimo.

Os limites das soluções pretendidas Z_i , podem ser obtidas de igual modo ao aplicado a X_i como podemos ver pela expressão:

$$\text{Max } Z_i = Z_{0i} + \sum_{j=1}^m b_{ij} (Y_{Lj} - Y_{0j}) \quad (3.16)$$

onde m é a dimensão do vector Y , b_{ij} são coeficientes da matriz B obtida pela linearização em (Z_0, Y_0) .

Tal como no cálculo de X , para Z também é efectuado um processo iterativo para obter as matrizes de sensibilidades B de linearização no ponto máximo ou mínimo.

Para calcular Z_M recorre-se à expressão (3.2) e assim temos os valores dos extremos das variáveis de saída.

Desta forma obtêm-se as matrizes de sensibilidade para três pontos distintos que podem ser usados para o cálculo de X e Z pelas expressões (3.3) e (3.5).

Em [14] é apresentado um outro método que não é mais do que uma extensão do BLF. Este método, em vez de utilizar o máximo ou mínimo das funções dadas obtém pontos intermédios de linearização.

Para encontrar os pontos intermédios de linearização considera um intervalo menor das funções de entrada. Como agora os pontos máximos e mínimos são pontos mais próximos do ponto médio estes novos pontos de linearização são pontos intermédios entre os extremos da função total e o seu ponto médio. Com estes novos extremos o algoritmo BLF é aplicado para obter uma nova solução do sistema.

Os novos podem ser obtidos pelas seguintes expressões:

$$Y'_{j-max} = Y_{0j}(1 - \beta) + \beta \times Y_{j-max} \quad (3.17)$$

$$Y'_{j-min} = Y_{0j}(\beta - 1) - \beta \times Y_{j-min} \quad (3.18)$$

onde β é um factor de encurtamento que pode variar entre 0 e 100%.

Pela figura 3-2 retirada de [14] podemos ver um exemplo de como Y_j pode ser parcialmente truncada.

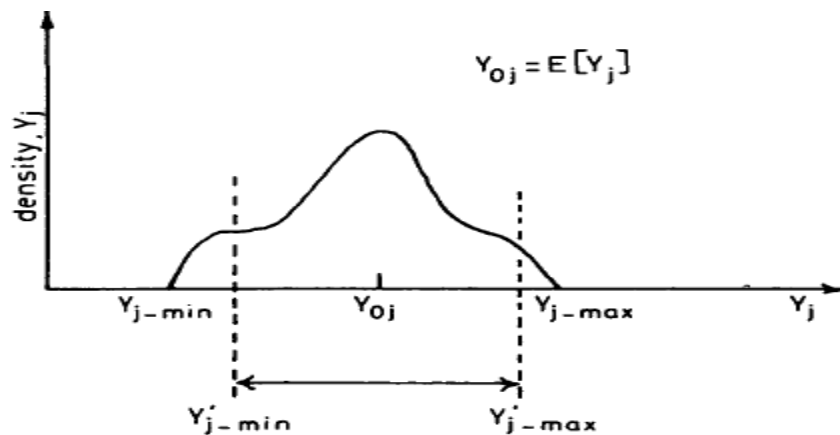


Figura 3-2 - Função densidade de probabilidade parcialmente truncada.

A vantagem de obter pontos intermédios de linearização isoladamente pode não ser evidente, pois continua-se a ter uma boa aproximação no ponto de linearização mas longe

dessa região crescem os erros. A vantagem verifica-se ao combinar as várias linearizações na mesma solução, ou seja, obter as funções das soluções para os vários pontos de linearização e depois obter a função final a partir das funções parciais que melhor se adequam ao intervalo em causa.

Mesmo quando não se calculam pontos de linearização intermédios, ou seja, consideramos toda a função de entrada, temos 3 pontos e linearização que são o mínimo, máximo e o valor esperado. Com estes três pontos podemos obter três soluções distintas para cada variável que devem ser combinadas, na tabela seguinte é apresentada uma forma de combinar as soluções obtidas para cada variável, descrita em [14].

Tabela 3-1- Combinação das soluções obtidas para os diferentes pontos de linearização.

Valor da variável X	Linearização usada
$X < X_{valor\ esperado} + \frac{(X_{valor\ esperado} - X_{mínimo})}{2}$	$X_{mínimo}$
$X < X_{valor\ esperado} + \frac{(X_{valor\ esperado} - X_{mínimo})}{2}$ e $X < X_{máximo} + \frac{(X_{máximo} - X_{valor\ esperado})}{2}$	$X_{valor\ esperado}$
$X < X_{máximo} + \frac{(X_{máximo} - X_{valor\ esperado})}{2}$	$X_{máximo}$

Apesar de na tabela só constarem três pontos de linearização o mesmo raciocínio é aplicado para incluir pontos intermédios. Quanto maior o número de pontos de linearização melhor será a solução, porém cresce o tempo de execução. Assim, estes não deverão ser demasiados.

3.1.3 Multilinearização

Tal como já foi dito anteriormente, a linearização num único ponto oferece resultados bastantes reais junto do ponto de linearização, mas em zonas mais afastadas, são acrescidos alguns erros. Novas técnicas para eliminar ou diminuir esses erros foram desenvolvidas e serão explicadas de seguida.

A expansão do método BLF combinando os vários pontos de linearização é um exemplo de multilinearização.

Um outro método de multilinearização é apresentado em [16] combina métodos analíticos de convolução e métodos de simulação. Este método considera a soma das potências geradas e das perdas, dada pela seguinte expressão, de forma a considerar a dependência entre variáveis:

$$\sum_{i=1}^{N_G} Y_{Gi}(k) = D(k) + perdas \quad (3.19)$$

onde N_G é o número de unidades de geração e $D(k)$ total de carga dado pela expressão:

$$D(k) = \sum_{i=1}^{N_D} Y_{Di}(k) \quad (3.20)$$

onde N_D é o número de unidades de carga.

Para obter os valores de $\sum_{i=1}^{N_G} Y_{Gi}(k)$ e $D(k)$ são aplicados métodos de convolução, simulação ou invocando o Teorema de Limite Central.

Se considerarmos N_L o número de linearizações, é possível dividir a função de densidade de probabilidade em N_L intervalos pelo seguinte factor α dado pela expressão:

$$\alpha = \frac{\gamma}{N_L + 1} \quad (3.21)$$

onde γ é o desvio que define o intervalo de confiança de D , e obtemos os intervalos da seguinte forma:

$$\begin{aligned} D_0 &\rightarrow \{\mu_d - \alpha\sigma_d; \mu_d + \sigma_d\} \\ D_{+1} &\rightarrow \{\mu_d + \alpha\sigma_d; \mu_d + 2\alpha\sigma_d\} \\ D_{-1} &\rightarrow \{\mu_d - 2\alpha\sigma_d; \mu_d - \alpha\sigma_d\} \\ &\text{etc...} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Na figura 3-3, retirada de [15], podemos ver melhor como é dividida a função de densidade de probabilidade da carga em sub intervalos.

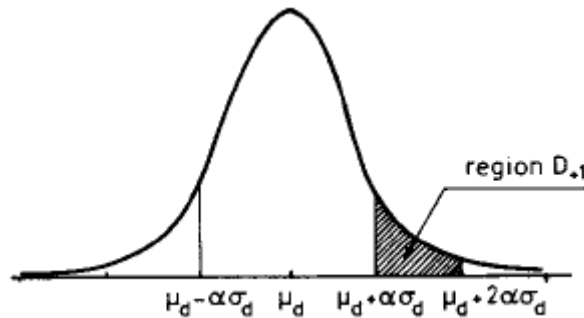


Figura 3-3 - Divisão em intervalos da função de densidade de probabilidade de D .

A cada intervalo corresponde um ponto de linearização. Tendo o valor de γ e N_L , é possível obter os intervalos de valores de $D(k)$.

Em cada intervalo é calculado o valor esperado desse mesmo intervalo estes valores serão os pontos de linearização utilizados para o cálculo das soluções nesses intervalos respetivamente.

Em variáveis que tenham uma variância pequena não será de grande interesse linearizar no ponto máximo no sub intervalo da cauda máxima, e de forma análoga para o mínimo, tal como é feito no BLF. Como a influência do valor máximo nem sempre será significativa, utilizar esse ponto de linearização fará com que a solução apresente um erro baixo numa zona muito reduzida, e assim o valor esperado desse sub intervalo oferece uma solução com um erro mais reduzido para esse sub intervalo.

Este algoritmo começa a obter o valor de $D(k)$, os valores de $Y_{Di}(k)$ que origina $D(k)$ são obtidos, respeitando a expressão (3.19) e as capacidades de produção, dados pelo com base na política de despacho respeitando as suas funções de densidade de probabilidade.

Os pontos de linearização são obtidos através da ocorrência de $Y_{Di}(k)$ simultaneamente com a sua classificação de acordo com as regiões de carga $\{Y_0(k), Y_{-1}(k), Y_{+1}(k), etc\}$.

De um modo geral é considerada uma linearização num dado ponto Y_L executa-se um trânsito de potências convencional (TPC) e com a expressão (3.3) obtém-se o vetor X_L . De seguida é possível obter Z_L pela expressão (3.5). Durante a simulação nem sempre são conhecidas as perdas. Para a equação (3.19), estas apenas podem ser obtidas depois de executado um TPC, depois de conhecido o valor das perdas este deve ser incluído na equação (3.19) e repetir o processo de linearização.

3.1.4 Discretização

Apesar de algumas funções de densidade de probabilidade de potências dadas serem de natureza normal, para aplicação do algoritmo é necessário que todas se apresentem de forma discreta.

Será então necessário primeiro truncar a função, estabelecer os limites máximo e mínimo. Como vimos atrás em alguns métodos, os limites serão dados pelo intervalo: $\{\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma\}$, outros métodos têm um algoritmo específico para calcular este mesmo intervalo.

De seguida definir o número de intervalos a dividir. O número de intervalos deverá ser o mesmo para todas a funções dadas, assim como o espaçamento dos intervalos deverá ser sempre o mesmo. Em [17] podemos ver uma breve explicação da discretização de uma função densidade de probabilidade Normal. A figura 3-4 ajuda a perceber a discretização de uma função.

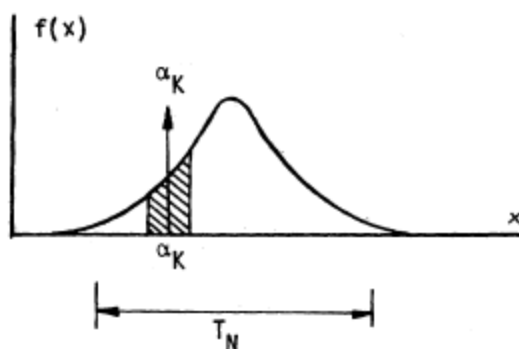


Figura 3-4 - Função densidade de probabilidade Normal e respetivo valor discreto.

O valor de α_k corresponde à área a sombreado, além dos valores discretos α_k a função deve ser truncada, mas de forma a que não negligencie demasiada informação, logo $\sum_{k=1}^n \alpha_k$ deve ser o mais próximo possível da unidade.

3.1.5 Convolução

Como as equações para este tipo de algoritmo não serão somente de carácter algébrico, será necessário aplicar algumas técnicas de convolução para obter a solução, entre as quais

podemos aplicar o Teorema de Limite Central (TLC), Transformada de Laplace (TL), chamado também em [17] como método convencional ou a Transformada Rápida de Fourier (TRF).

Quando comparada a TL com a TRF, para funções discretas com poucos valores, esta apresenta-se mais rápida, mas se número de valores discretos aumentar a convolução com TL torna-se bastante demorada, como podemos ver na figura 3-5. Os valores apresentados correspondem à aplicação a uma rede de 14 barramentos descrita em [17].

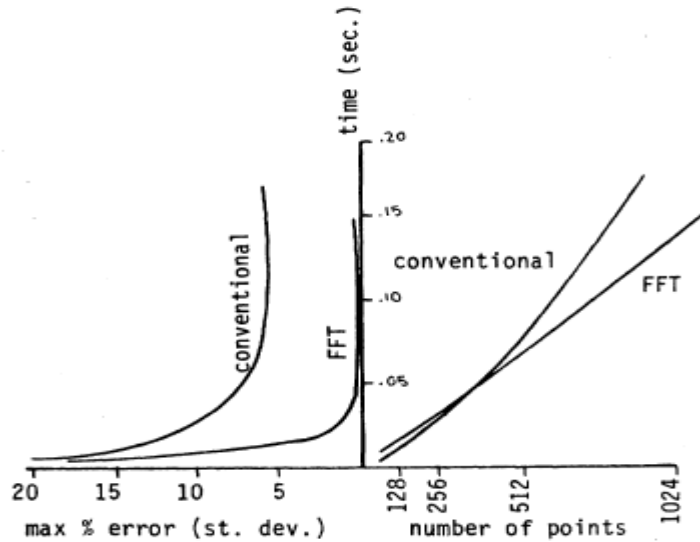


Figura 3-5 - Relação entre o número de valores discretos de cada função/erro e o tempo de cálculo.

A utilização do Teorema de Limite Central garante que as soluções do trânsito de potências apresentam a forma de uma função de densidade de probabilidade Normal. Como podemos ver em [17], tal nem sempre acontece, nem mesmo quando todas as potências injetadas são dadas por densidades de probabilidade Normais devido à dependência entre variáveis. No que diz respeito ao TLC e ao elevado tempo de cálculo para funções com elevado número de valores discretos para a TL, a TRF será o melhor método a aplicar.

Transformada Rápida de Fourier

A Transformada Rápida de Fourier consiste em fazer uma combinação de impulsos, logo para fazer a convolução entre duas funções de densidade é necessário que ambas estejam definidas no mesmo período e tenham o mesmo passo.

Uma forma de definir o período e o passo é descrita em [18], considerando duas funções x e y resultando da convolução $Z = x + y$. O período é definido pela expressão:

$$T_Z = (x_{max} + y_{max}) - (x_{min} + y_{min}) \quad (3.23)$$

Definindo N como o número de pontos para representar Z , conseguimos definir a gama de valores para Z :

$$passo = T_Z/N \quad (3.24)$$

$$Z = [x_{min} + y_{min}; passo + (x_{min} + y_{min}); 2 * passo + (x_{min} + y_{min}); \dots; N * passo + (x_{min} + y_{min})] \quad (3.25)$$

Os vetores de x e y passam agora a ser representados pelos mesmos valores de Z , como alguns dos impulsos dos vectores de x e y podem não coincidir com o vector Z é necessário fazer a partilha desses mesmos impulsos pelos valores dos imediatamente antes e depois, a figura 3-6 retirada de [17] exemplifica a partilha dos impulsos para uma dada função:

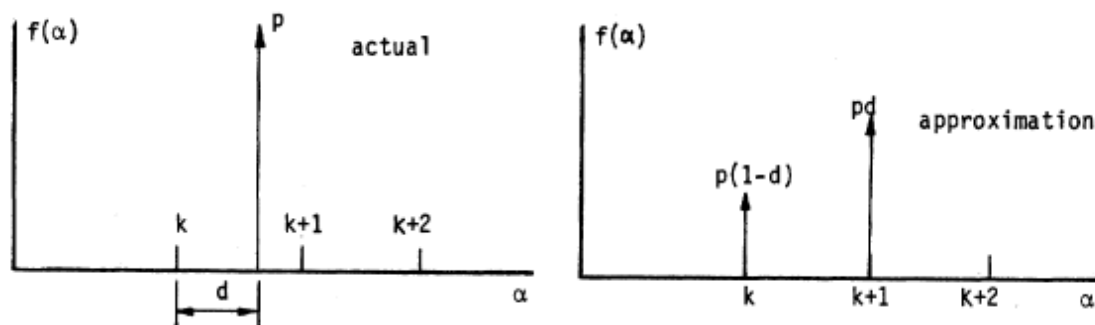


Figura 3-6 - Partilha do impulso para TRF.

3.2 - Metodologias Numéricas

3.2.1 Monte Carlo Exato

O método de Monte Carlo consiste em correr um algoritmo de cálculo de trânsito de potências determinístico para cada vetor que Y pode assumir. O estado do vetor Y_j deve ser sorteado por números pseudo-aleatórios.

Como as potências geradas e consumidas tem uma incerteza tal que podem ser representadas por funções de densidade de probabilidade, o vetor Y pode assumir inúmeros valores. Todos os valores têm uma probabilidade de ocorrência logo deve ser considerada e tida em conta essa mesma probabilidade para que a solução obtida seja exata.

Em [16] e [17] são mencionadas algumas das vantagens do método de Monte Carlo exato entre as quais podemos dizer que reconhece quais estados do vetor Y que violam restrições, a dependência entre as cargas e a geração é considerada assim como a possibilidade de alteração da topologia da rede.

Uma desvantagem é que o número de ensaios para obter uma boa representação das incertezas deve ser elevado. Por outro lado, para cada estado do vetor Y é executado o algoritmo para os novos valores, logo podem ocorrer estados do vetor Y em que o algoritmo não convirja.

3.2.2 Monte Carlo linear

Com o intuito de diminuir o tempo de simulação e problemas de convergência um novo método de simulação de Monte Carlo pode ser considerado, que combina métodos analíticos e simulação.

O método de simulação de Monte Carlo linearizado é muito semelhante ao modelo exato mas neste caso a matriz Jacobiana utilizada mantém-se inalterável, ou seja, é calculada para

um dado ponto Y_0 que poderá ser o ponto do valor esperado ou um ponto dado por algum algoritmo auxiliar, tal ponto máximo dado pelo BLF.

Como este método combina o modelo exato com uma linearização, considera-se que a rede se mantém inalterada tal como nos métodos analíticos.

3.3 - Discussão

3.3.1 - Linearizações nas Metodologias Numéricas

Para comprovar a veracidade dos resultados obtidos num Trânsito de potências linear ou multilinear, será interessante comparar uma simulação de Monte Carlo exata ou linear, ou mesmo uma comparação entre os mesmos.

A primeira comparação será entre o método de Monte Carlo linear e o modelo de Monte Carlo exato, apresentada em [14], usando como rede de teste um sistema de 14 barramentos.

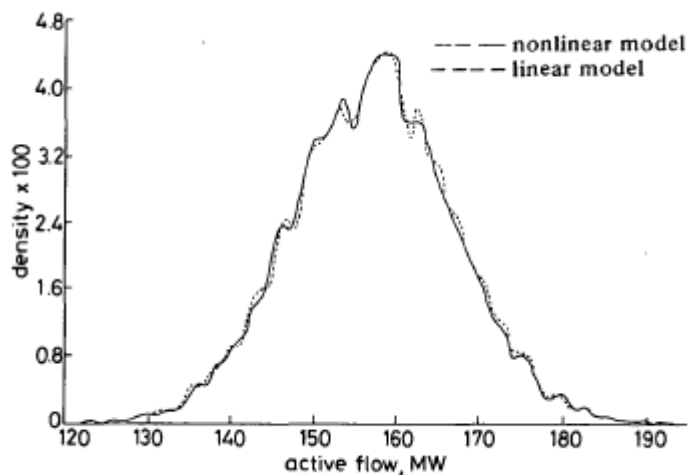


Figura 3-7 - Função densidade de probabilidade utilizando o método de Monte Carlo linear e método de Monte Carlo exato para 5000 sorteios na linha 1-2 e $\rho=1$.

Como se pode ver na figura 3-7, as soluções obtidas por ambos são semelhantes, o que indica que as funções de entrada têm um nível baixo de incerteza, ou seja uma grande concentração na região da em torno do valor esperado.

Na figura 3-8 temos o trânsito de potência ativa para outra linha mas neste caso a incerteza associada é maior.

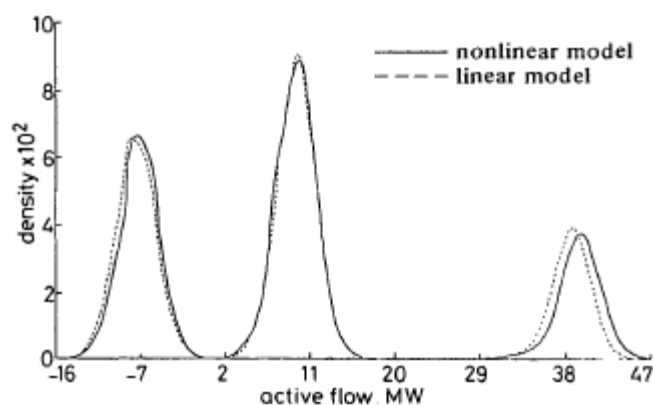


Figura 3-8 - Função densidade de probabilidade utilizando o método de Monte Carlo linear e método de Monte Carlo exato para 5000 sorteios na linha 9-14 e $\rho=15$.

A diferença verificada nas caudas da função indica que as funções de entrada possuem uma concentração considerável nos extremos, ou seja, um nível mais elevado de incerteza, pois junto do ponto de linearização a diferença não é perceptível.

Todavia, a grande diferença verifica-se quando comparamos potências reativas como no caso da figura 3-9.

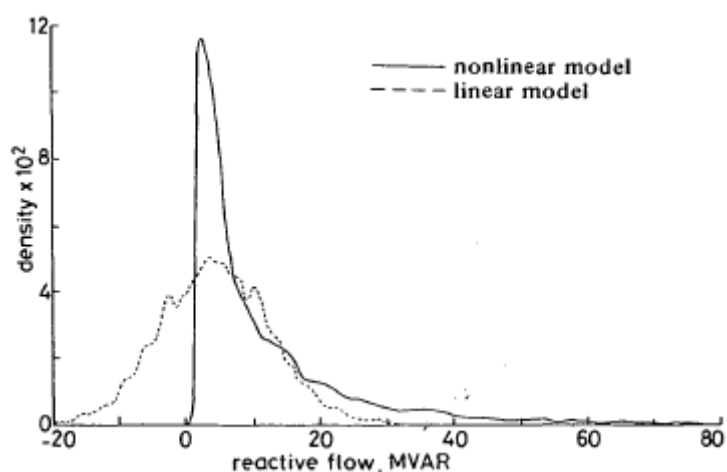


Figura 3-9 - Função densidade de probabilidade utilizando o método de Monte Carlo linear e método de Monte Carlo exato para 5000 sorteios na linha 2-3 e $\rho=15$.

Esta figura demonstra como a linearização pode introduzir erros grosseiros em algumas funções. Esta diferença deve-se ao elevado grau de não-linearidade.

Em [14] encontra-se também uma comparação, para a mesma rede, entre o método de Monte Carlo exato, Monte Carlo linear no ponto do valor esperado e $X_{Máximo}$ obtido pelo BLF.

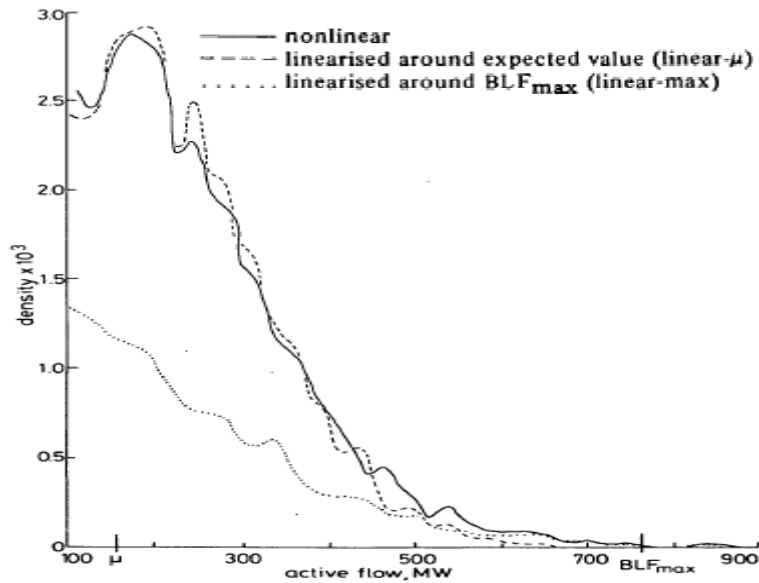


Figura 3-10 - Função densidade de probabilidade método de Monte Carlo exato e linear para 5000 sorteios na linha 1-2.

O erro de linearização da função obtida pela linearização no ponto dado pelo BLF em zonas afastadas do máximo é bastante evidente, ao contrário do que acontece junto do máximo. Este exemplo demonstra a importância de obter pontos intermédios de linearização e a vantagem de os combinar.

Com vários pontos de linearização obtidos a partir da expansão do BLF e devidamente combinados, a solução obtida foi a seguinte: (no qual para uma linearização o ponto utilizado foi o máximo).

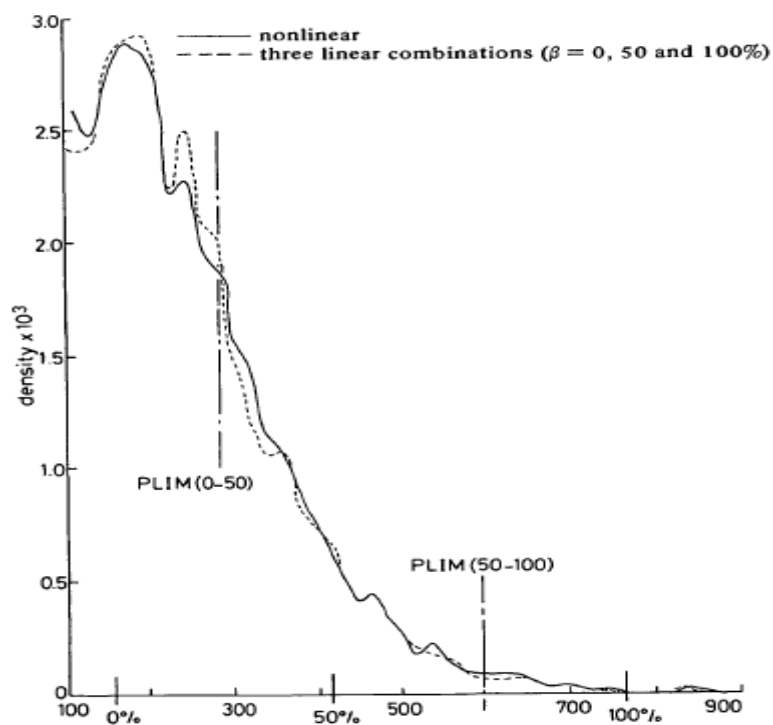


Figura 3-11 - Função densidade de probabilidade método de Monte Carlo exacto e linear combinando multilinearizações para 5000 sorteios na linha P1-2.

Na figura 3-11, com três pontos de linearização correspondentes a $\beta = 0,50$ e 100% o erro de linearização diminui drasticamente em grande parte da função.

A figura 3-12 compara o trânsito de potência reativa obtido com uma e três linearizações.

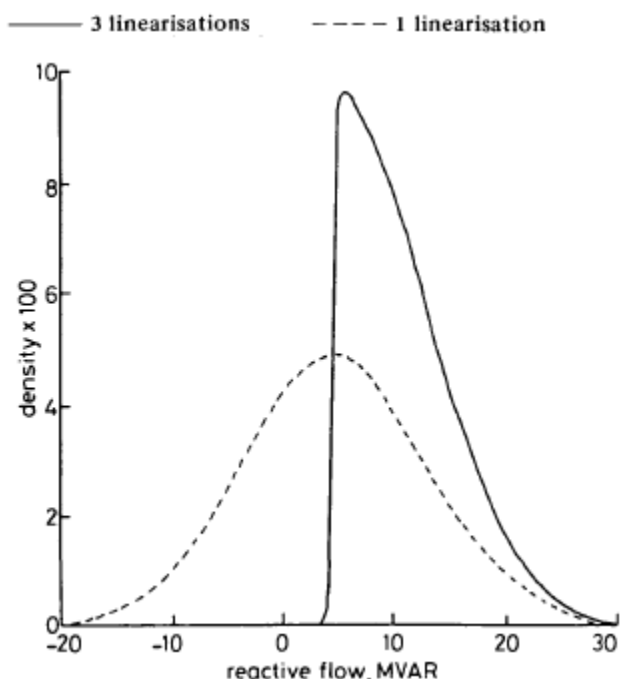


Figura 3-12 - Função densidade de probabilidade método de Monte Carlo linear combinando multilinearizações para 5000 sorteios na linha Q2-3.

Com a solução obtida pelo método de Monte Carlo com a combinação dos três pontos de linearização com a solução obtida com uma linearização apresentada na figura 3-12, vemos que apesar de não apresentarem valores exatamente idênticos são bastante próximos. O que comprova que a combinação de pontos de linearização oferece valores bastante próximos da realidade e não necessita de demasiado tempo para obter uma solução tal como acontece para o método de Monte Carlo exato.

Em [17] foram efetuadas várias simulações para o método de Monte Carlo exato e linear. Serão apresentados quatro casos que mostram o desempenho de método:

- Caso 1: Aumento do número de sorteios para Monte Carlo linear;
- Caso 2: Comparação entre método de Monte Carlo exato e linear para 5000 sorteios;
- Caso 3: A mesma comparação do caso 2 mas para uma função com forma irregular;
- Caso 4: a mesma situação do caso 1 mas com uma variância mais elevada.

Todas as simulações foram testadas para a mesma rede de 14 barramentos apresentada em [17].

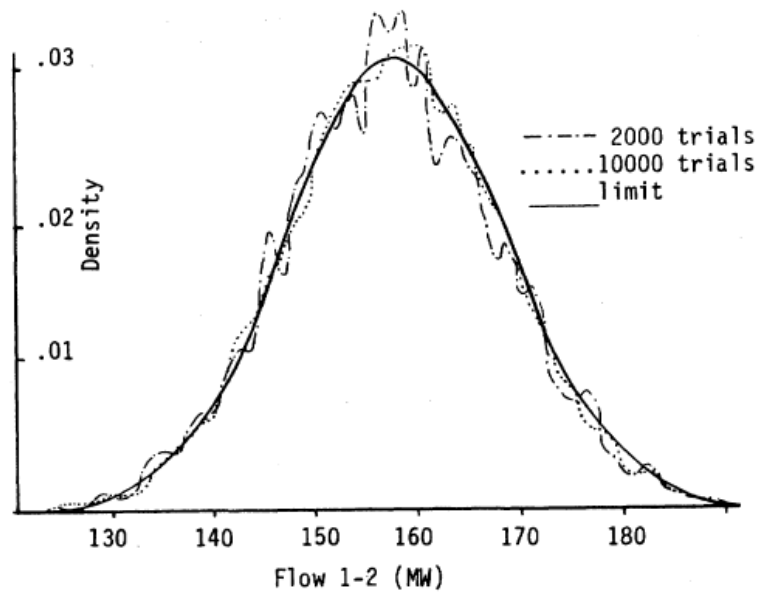
Caso 1:

Figura 3-13 - Função densidade de probabilidade utilizando método de Monte Carlo linear para diferentes números de sorteios.

Como se pode ver na figura 3-13 á medida que aumenta o número de sorteios a função obtida aproxima-se de uma função densidade de probabilidade Normal.

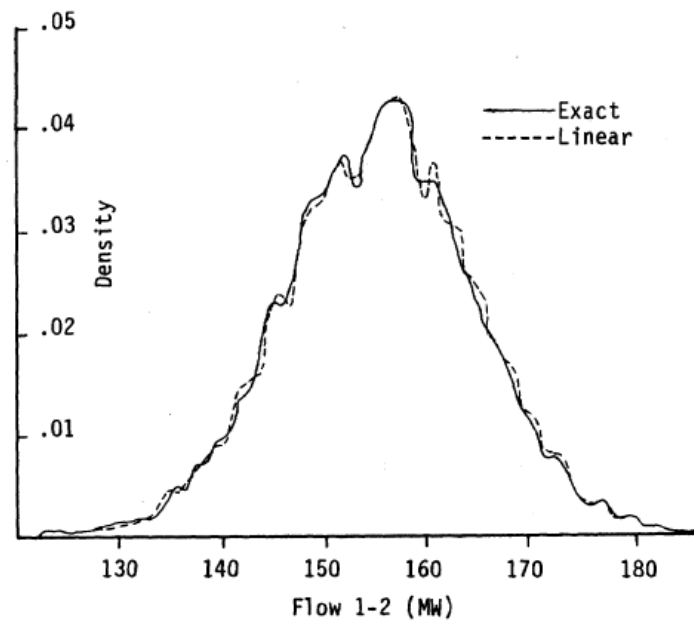
Caso 2:

Figura 3-14- Função densidade de probabilidade utilizando método de Monte Carlo exato e linear.

A aproximação linear, em casos em que a solução é muito próxima de uma função de densidade normal, o erro introduzido por esta aproximação não é muito significativo, o que acontece quando a incerteza tem um valor baixo.

Caso 3:

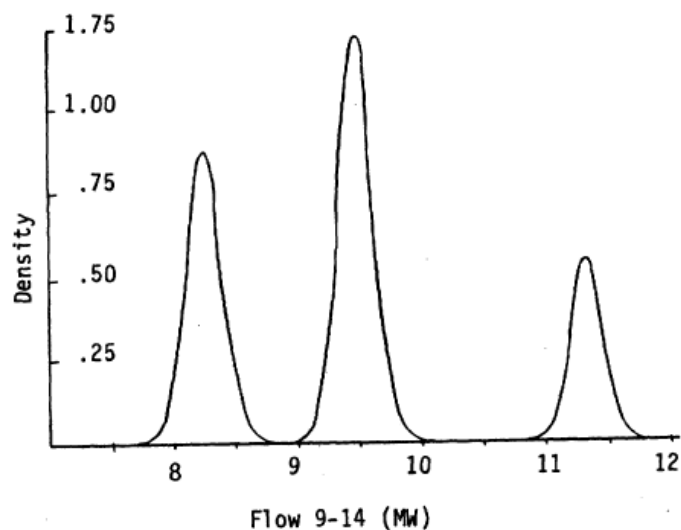


Figura 3-15 - Função densidade de probabilidade utilizando método de Monte Carlo exato para uma função com forma irregular.

Esta solução obtida pelo método de Monte Carlo exato confirma que nem todas as soluções apresentam uma função densidade de probabilidade normal e como tal o Teorema de Limite central não pode ser aplicado, correndo-se o risco de introduzir erros significativos.

Caso 4:

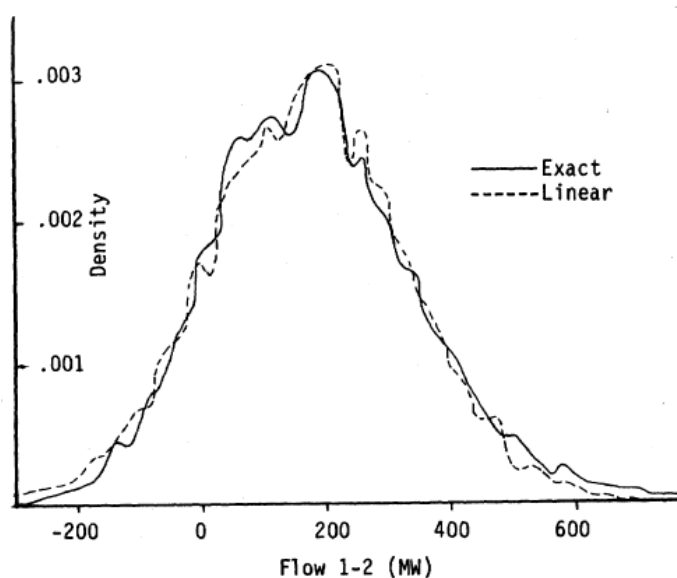


Figura 3-16 - Função densidade de probabilidade utilizando método de Monte Carlo exacto e linear.

Se compararmos esta forma da função com a obtida neste caso, com a solução obtida para o caso 2, verifica-se que se a incerteza associada as funções de entrada aumenta o erro associado à linearização e é mais evidente.

Para contornar este efeito e diminuir o tempo de simulação associado ao método de Monte Carlo exato devem ser aplicadas multilinearizações. O número de linearizações não deve ser demasiado elevado, pois com o aumento de linearizações o tempo de execução do algoritmo multilinear também vai aumentar.

3.3.2 - Linearização nas Metodologias Analíticas: Exemplo de Aplicação a um Sistema de Seis Barramentos.

Na secção anterior foram ilustrados alguns exemplos comparativos relativos a linearização utilizando metodologias numéricas. Para o caso do método de Monte Carlo, esta análise é importante sobretudo no que diz respeito a comparação entre a formulação linear e não linear. Pelo contrário, nas metodologias analíticas, que possuem sempre um carácter linear, esta análise justifica-se para estudar o efeito da linearização em diferentes pontos. Assim, nesta secção, uma metodologia analítica será aplicada a um sistema de seis barramentos, cujas características se encontram no anexo A, com o intuito de avaliar o impacto de diferentes pontos de linearização nos resultados obtidos. Serão tidos em conta diferentes valores de incerteza nas potências injectadas nos barramentos.

O valor de geração de potência da rede é representada por uma função discreta com oito pontos, como mostra a tabela 3-2.

Tabela 3-2 - Valores de geração ativa e reativa e respetiva probabilidade.

Barr	Geração MW								Probabilidade de geração MW							
1	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0	0	0	0	1	0	0	0
2	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0	0	0	0	1	0	0	0
3	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0	0	0	0	1	0	0	0
4	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0	0	0	0	1	0	0	0
5	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0	0	0	0	1	0	0	0
6	13.35	13.45	13.55	13.65	13.75	13.85	13.95	14.05	0	0	0	0.2	0.6	0.2	0	0
Barr	Geração Mvar								Probabilidade de geração Mvar							
1	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0	0	0	0	1	0	0	0
2	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0	0	0	0	1	0	0	0
3	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0	0	0	0	1	0	0	0
4	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0	0	0	0	1	0	0	0
5	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0	0	0	0	1	0	0	0
6	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0	0	0	0	1	0	0	0

Tal como a geração, a carga da rede também é representada por uma função discreta com oito pontos, conforme apresentado na tabela 3-3.

Tabela 3-3 - Valores de carga ativa e reativa e respetiva probabilidade.

Barr	Carga MW								Probabilidade de carga MW							
	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0	0	0	0	1	0	0	0
1	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0	0	0	0	1	0	0	0
2	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	0	0.1	0	0.3	0.3	0.3	0	0
3	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0	0	0	0	1	0	0	0
4	3	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	0	0.3	0.3	0.3	0	0	0.1	0
5	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	0	0.3	0.3	0.3	0	0	0.1	0
6	2.45	2.55	2.65	2.75	2.85	2.95	3.05	3.15	0	0.1	0	0.3	0.3	0.3	0	0
Barr	Carga Mvar								Probabilidade de carga Mvar							
	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0	0	0	0	1	0	0	0
1	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0	0	0	0	1	0	0	0
2	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	0	0.3	0.3	0.3	0	0	0.1	0
3	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0	0	0	0	1	0	0	0
4	1.35	1.45	1.55	1.65	1.75	1.85	1.95	2.05	0	0.1	0	0.3	0.3	0.3	0	0
5	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	0	0.1	0	0.3	0.3	0.3	0	0
6	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95	0	0.3	0.3	0.3	0	0	0.1	0

Resultados obtidos

Para obter as tensões nos barramentos foram aplicados vários pontos de linearização. A figura 3-17 mostra a solução obtida para o módulo das tensões nos barramentos 2, 3, 4 e 5 com a linearização feita no valor esperado. Os resultados são apresentados numa linha contínua para ajudar a interpretação gráfica, apesar de serem valores discretos, contendo 64 pontos.

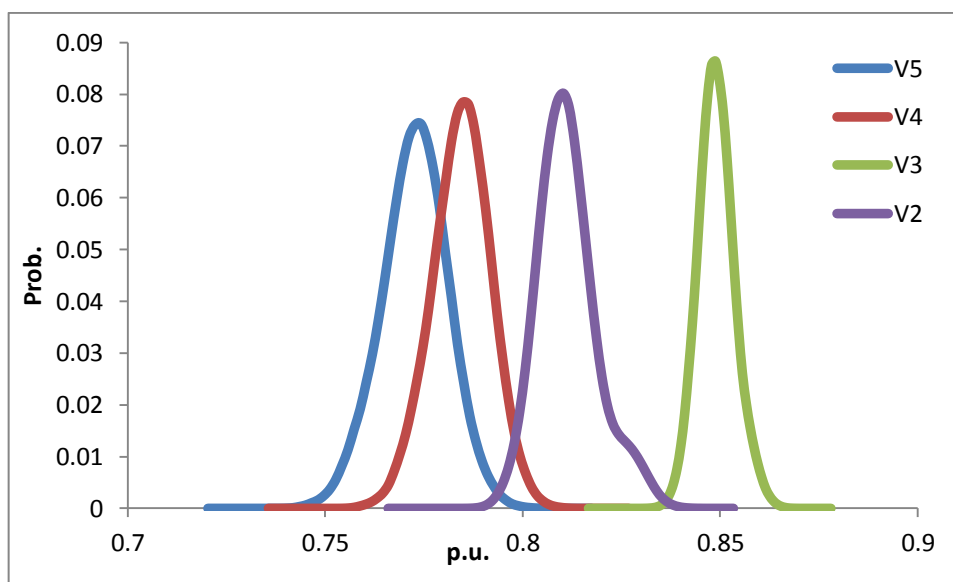


Figura 3-17 - Forma da função obtida para tensões obtidas com linearizações com o valor esperado.

Para verificar o resultado da variação da incerteza, esta foi aumentada. Como mostra a tabela 3-4, a incerteza da geração manteve-se.

Tabela 3-4 - Valores de carga ativa e reativa e respetiva probabilidade.

Barr	Carga MW								Probabilidade de carga MW							
1	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0	0	0	0	1	0	0	0
2	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	0	0.1	0	0	0	0.3	0.3	0.3
3	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0	0	0	0	1	0	0	0
4	3	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	0.3	0.3	0.3	0	0	0	0.1	0
5	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	0.3	0.3	0.3	0	0	0	0.1	0
6	2.45	2.55	2.65	2.75	2.85	2.95	3.05	3.15	0	0.1	0	0	0	0.3	0.3	0.3

Barr	Carga Mvar								Probabilidade de carga Mvar							
1	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0	0	0	0	1	0	0	0
2	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	0.3	0.3	0.3	0	0	0	0.1	0
3	-0.03	-0.02	-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0	0	0	0	1	0	0	0
4	1.35	1.45	1.55	1.65	1.75	1.85	1.95	2.05	0	0.1	0	0	0	0.3	0.3	0.3
5	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	0	0.1	0	0	0	0.3	0.3	0.3
6	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95	0.3	0.3	0.3	0	0	0	0.1	0

A figura 3-18 ilustra o resultado obtido para as tensões, com a linearização no valor esperado com um nível de incerteza mais elevado.

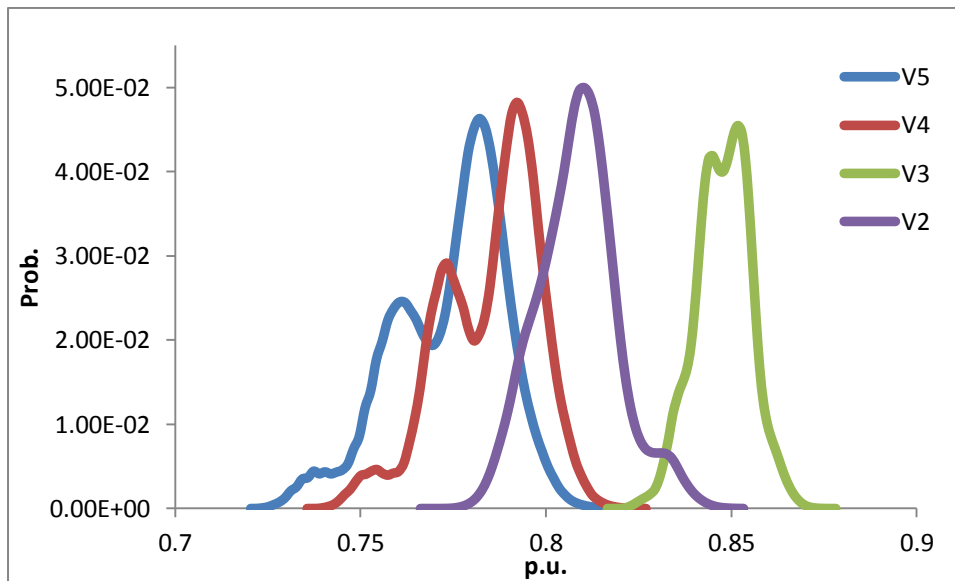


Figura 3-18 - Forma de onda obtida para tensões obtidas com linearizações com o valor esperado, com incerteza mais elevada.

Podemos verificar que ao aumentar a incerteza a forma da função apresenta irregularidades quando comparada com a forma da função obtida com uma incerteza menor. Esta diferença era esperada e comprova que a utilização do Teorema de Limite Central face à Transformada Rápida de Fourier pode levar a resultados errados.

Para obter o trânsito de potência reativa na linha 8 foram aplicados vários pontos de linearização. A figura 3-19 mostra a solução obtida com a linearização feita nos pontos mínimo, valor esperado e máximo. Os resultados são apresentados numa linha contínua para ajudar a interpretação gráfica, tal como acontece nas figuras anteriores.

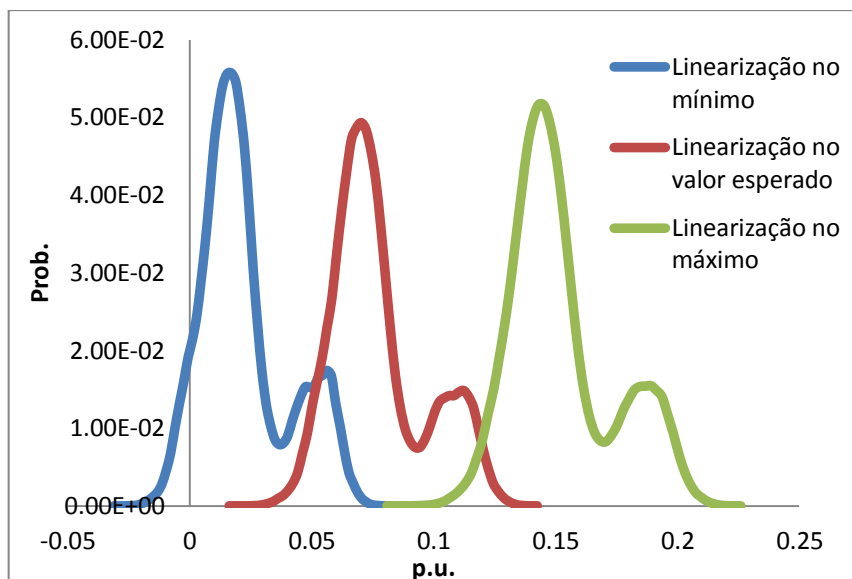


Figura 3-19 - Função de densidade de probabilidade para o trânsito de potência reativa na linha 8, para diferentes pontos de linearização.

É possível ver que a forma da função obtida para as diferentes linearizações apresenta valores bastante diferentes. Estas diferenças mostram que a utilização de um único ponto, para o cálculo de uma variável, pode apresentar soluções com erros consideráveis.

Para evitar esses mesmos erros é necessário a combinação das três formas de onda, aplicando o conceito de multilinearização.

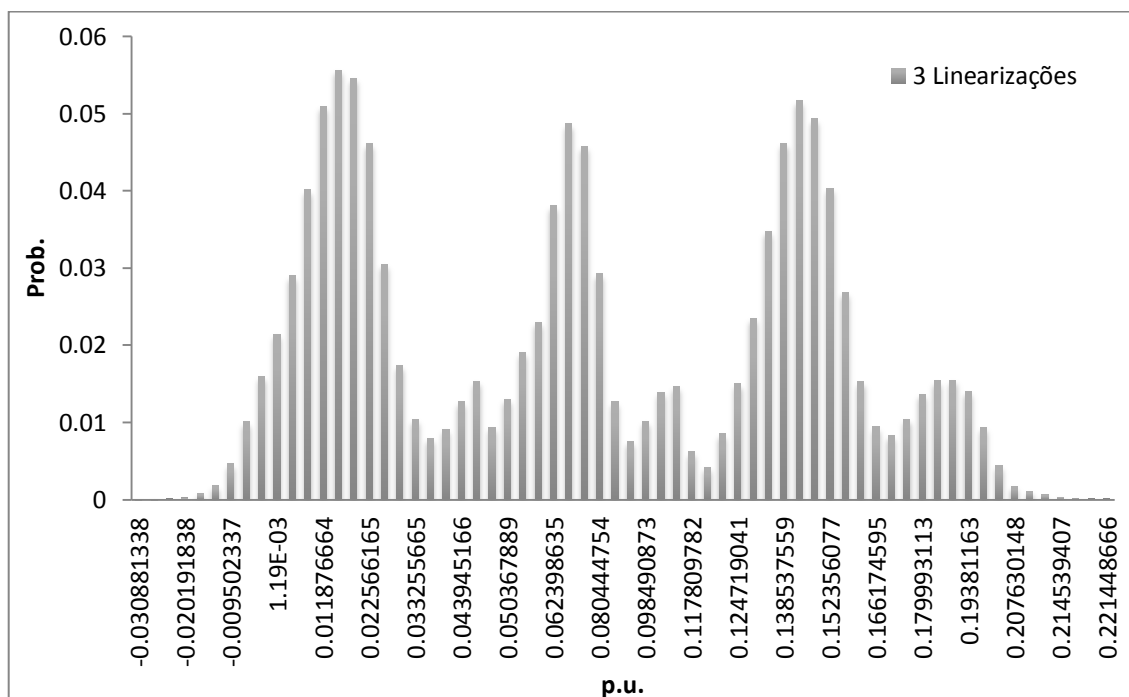


Figura 3-20 - Forma de onda obtida combinando as 3 formas de onda obtidas para o trânsito de potência reativa na linha 8.

A figura 3-20 ilustra o conceito de multilinearização, onde vemos que as probabilidades para cada valor de potência estão mais dispersas, o que não acontece quando obtemos a solução com um único ponto de linearização.

3.4 - Conclusão

Analisadas as várias metodologias para o cálculo do trânsito de potências probabilístico, pode-se concluir que as metodologias analíticas são mais adequadas para a representação de incertezas oriundas dos veículos eléctricos na avaliação da rede de transporte. As metodologias são mais rápidas do que as metodologias numéricas não lineares. Apesar de serem menos precisas, do que os métodos de Monte Carlo tradicionais, os erros podem ser mitigados recorrendo a técnicas multilinearização. Nas metodologias analíticas o recurso à transformada rápida de Fourier permite acelerar consideravelmente os tempos computacionais. Embora não tenha sido discutido com profundidade as questões relacionadas a performance do método, este atributo é sem dúvida um fator importante que condicionou a escolha por esta metodologia.

Capítulo 4

Modelo de Carga de Veículos Elétricos

Da perspectiva dos Sistemas Elétricos de Energia, os VEs são vistos como uma carga que será agregada à carga convencional do sistema. O comportamento da carga dos VEs está intimamente ligado à forma de utilização dos veículos por parte dos seus utilizadores, e este varia de forma aleatória ao longo do tempo. Presume-se que o comportamento diário dos cidadãos em relação a mobilidade (utilização de veículos motores) não alterar-se-á e, portanto, o modelo utilizado nos estudos apresentados deve levar em conta a mobilidade da população motorizada [19]. O valor de carga consumida pelos VEs dependerá das características técnicas conforme a classe que o VE se encontra. Em [20], foram adotadas quatro classes de VEs. Para determinar o consumo dos VEs, o modelo desenvolvido em [21], é baseado num processo de contagem que resultará na estimativa do número de VEs numa determinada hora do dia. Neste capítulo, será apresentado o modelo dos VEs [21] adotado para determinar a função de densidade de probabilidade do número de VEs para uma hora do dia que será utilizada como dado de entrada para a ferramenta do trânsito de potência probabilístico desenvolvida.

4.1 - Modelos

4.1.1 - Mobilidade da População

O Instituto Nacional de Estatísticas [19] realizou um estudo para a caracterização da mobilidade dos cidadãos residentes em Portugal através de diversos conjuntos de variáveis, tais como o número de viagens e a sua duração, a hora do início das viagens, o tipo de transporte utilizado, as mudanças entre diferentes tipos de transporte, a distinção entre a mobilidade dos dias de semana e fins de semana.

Com este estudo podemos verificar que a mobilidade nas várias regiões analisadas não apresenta muitas diferenças mesmo quando estas regiões apresentam diferentes contextos económicos e sociais. Esta homogeneidade é observada em diversos critérios, sendo a quantidade de viagens por dia e a grande dependência das viagens com os motivos de trabalho e escola as que apresentam maior semelhança. A duração das viagens e os seus picos de ocorrência ao longo do dia estão também fortemente relacionadas nas regiões analisadas. Neste ponto convém salientar que, como este estudo se refere a regiões do território de Portugal, os resultados nele apresentados poderão não ser aplicáveis a outros países.

Nas regiões estudadas, ocorre uma média de 2,5 viagens por pessoa e por dia. Este resultado é evidenciado na tabela 4-1 onde se mostra também que a fração de população móvel relativamente ao total de população é superior a dois terços. Outro aspeto importante de salientar é o alto percentual da população móvel que utiliza um veículo para se deslocar. Finalmente, a baixa percentagem de viagens iniciadas numa dada região e terminadas noutra demonstra que a grande maioria dos destinos das viagens se encontram dentro da região de partida.

Neste trabalho iremos usar as estatísticas relacionadas com a utilização de veículos para modelizar o comportamento da mobilidade da população.

Tabela 4-1- Estatísticas de mobilidade nos dias de semana.

	Cávado / Ave	Grande Porto	Vale do Sousa / Baixo Tâmega	Entre Douro e Vouga	Total
Nº de viagens / pessoa / dia					
Iniciadas na região	2.6	2.5	2.2	2.1	2.5
Iniciadas na região de residência	2.4	2.1	2.0	2.9	2.1
Nº de viagens / família / dia					
Iniciadas na região de residência	8.0	5.9	6.5	6.1	6.6
População móvel / população residente (%)	78.2	75.7	71.1	67.0	74.9
População móvel com veículo / população móvel (%)	76.0	80.9	79.6	81.0	79.2
Nº de viagens / população móvel / dia	3.4	3.3	3.3	3.2	3.3
Nº de viagens externas / nº de viagens iniciadas na região	3.9	4.7	6.9	6.1	-
Nº de viagens externas / pessoa / dia	0.1	0.12	0.15	0.13	-

Tabela 4-2- Número de viagens nos dias de semana discriminadas por transporte e por motivo.

Nº de viagens / pessoa / dia	Cávado/Ave	Grande Porto	Vale do Sousa / Baixo Tâmega	Entre Douro e Vouga	Total
Viagens por tipo de transporte					
A pé	0.79	0.61	0.56	0.46	0.64
Veículo próprio	1.29	1.31	1.17	1.31	1.28
Transporte público	0.32	0.44	0.32	0.14	0.35
Outras	0.14	0.09	0.22	0.20	0.14
Viagens por motivo					
Trabalho	0.70	0.58	0.63	0.58	0.63
Escola	0.21	0.16	0.17	0.15	0.18
Compras	0.12	0.15	0.09	0.06	0.12
Lazer	0.23	0.31	0.21	0.21	0.26
Retorno a casa	1.19	1.08	1.07	0.99	1.11

A partir da tabela 4-2 é possível concluir que 52% das viagens são feitas usando veículo próprio. Com 61% das viagens efetuadas por veículo próprio, a região “Entre o Douro e Vouga” é a que verifica o maior uso deste tipo de meio de transporte. No total, o transporte público é o terceiro tipo de transporte mais usado, sendo novamente a região “Entre o Douro e Vouga” a que regista maior utilização. Por outro lado, os motivos das viagens relacionam a mobilidade com os hábitos da população.

A figura 4-1 ilustra a hora de chegada das viagens num dia de semana típico efetuadas por automóvel. Verifica-se que durante o dia existem três períodos de grande intensidade de chegadas nomeadamente durante as 7h-9h, as 12h-14h e as 18h-19h.

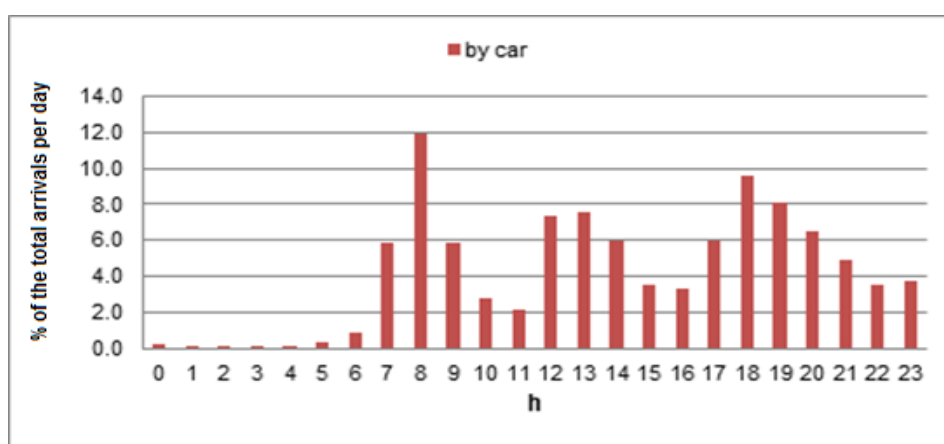


Figura 4-1 - Distribuição horária das chegadas de automóvel.

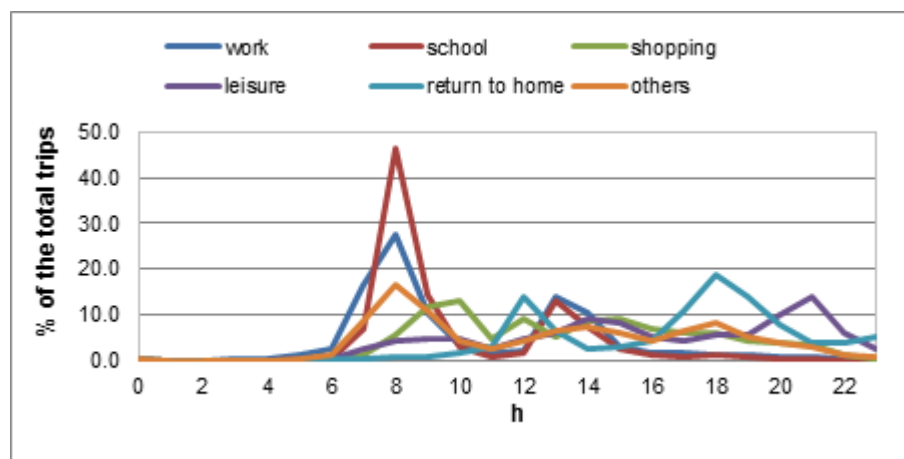


Figura 4-2 - Distribuição horária das viagens por motivo.

Apesar da grande variedade e quantidade de resultados disponíveis neste estudo, é importante salientar, tal como dito, que as práticas de mobilidade são extremamente semelhantes entre as várias regiões geográficas analisadas e, portanto, do ponto de vista do comportamento da mobilidade da população motorizada, esta em [21], foi estendida para representar o comportamento da mobilidade da população no país.

4.1.2 - Processo de Contagem do Número de Veículos Elétricos nos Pontos de Carregamento ou estações de Carregamento

O número de VEs que chegam a um Ponto de Carregamento (PC) ou uma Estação de Carregamento (EC) é uma variável aleatória discreta que pode ser modelizada por uma distribuição de Poisson [21]. Segundo esta distribuição, $\{X(t): t \geq 0\}$ é uma coleção de variáveis aleatórias onde $X(t)$ é o número de eventos (número de chegadas a um PC ou EC) que ocorreram num período de tempo t . O número de eventos ocorrido entre os instantes a e b ($b \geq a$) é dado por $X(b) - X(a)$ e segue uma distribuição de Poisson. Por outras palavras, o processo de Poisson é um processo de contagem contínua no tempo que possui as seguintes propriedades:

- O número de ocorrências entre intervalos disjuntos é independente um do outro;
- A distribuição de probabilidade do número de ocorrências num intervalo de tempo só depende da duração do intervalo, sem ocorrências contadas em simultâneo;
- Não existem contagens simultâneas.

Tendo em conta estas características pode-se concluir que a chegada dos VEs a um PC ou EC pode ser modelizada por um processo de Poisson, supondo que não existem chegadas simultâneas. O objetivo desta metodologia é, através do processo de contagem, estimar ao longo do dia o número de VEs em modo de carregamento para calcular a carga dos VEs. O processo de contagem é modelizado através de um processo de Poisson homogéneo. Este processo é caracterizado por uma taxa média, λ , que representa o número médio de chegadas no intervalo de tempo, $\{t, t + \tau\}$. A probabilidade de ocorrência de um determinado número de chegadas, $k = 0, 1, 2, \dots, \infty$, é dada por [22]:

$$P[X(t + \tau) - X(t) = k] = \frac{e^{-\lambda\tau}(\lambda\tau)^k}{k!} \quad (4.1)$$

onde $X(t + \tau) - X(t)$ é o número de chegadas de VEs no intervalo $\{t, t + \tau\}$.

Considerando o intervalo de tempo igual a uma hora, a taxa média de chegadas λ , é o único parâmetro necessário para se estimar o número de VEs que chegaram no intervalo de tempo, τ . A taxa média de chegadas do número de VEs a um PC, λ , é dada por:

$$\lambda = \sum_{k=0}^{\infty} k \times p_k \quad (4.2)$$

onde p_k é a probabilidade de ocorrência de k chegadas no intervalo de tempo especificado.

Entretanto, a informação disponível da figura 4-1, que apresenta a distribuição horária das chegadas durante um dia de semana típico, representa o parâmetro λ . A amostragem de um número da distribuição de Poisson é efetuada através de um algoritmo baseado no método da transformada inversa [23]. Este algoritmo resume-se nos seguintes passos:

- a) $n = 1$ e $a = 1$;
- b) Amostrar um número $U_n \sim U(0,1)$ e $a = a \times U_n$;
- c) Se $a \geq e^{-\lambda}$, então $n := n + 1$ e avançar para o passo b), senão retornar $X = n - 1$ como o número amostrado da distribuição de Poisson.

Finalmente a próxima secção apresenta as estratégias de carregamento que são fundamentais para a determinação da demanda de carga dos VEs.

4.1.3 - Estratégias de carregamento das baterias dos VEs

Em [7], as estratégias de carregamento dividem-se em: *dumb charging*, *dual tariff policy* e *smart charging*.

O *dumb charging* segue os hábitos tradicionais dos consumidores, em consequência o perfil da curva de carga dos VEs segue o perfil da curva de carga convencional, em consequência, há um aumento na carga do sistema em todo o perfil de carga. O carregamento *dual tariff policy*, promove o carregamento das baterias dos VEs durante as horas de vazio, onde geralmente há uma carga convencional menor e o preço da eletricidade é mais barato, ou num pequeno período de tempo durante o dia, que não é aplicado neste caso. Entretanto, esta estratégia de carregamento não permite controlo sobre o carregamento das baterias dos VEs. O *smart charging* é uma estratégia de carregamento que permite o controlo sobre o carregamento dos VEs. Esta promove a oportunidade dos VEs colaborarem com o Sistema Elétrico de Energia, aumentando o nível de penetração de fontes renováveis de energia elétrica, mantendo um nível adequado da segurança do abastecimento, e aumentando a reserva operacional dos sistemas [21].

A próxima secção apresenta o cálculo da carga associada ao modelo dos VEs que, através do processo de contagem, estima o número de VEs numa base horária e tem em conta as estratégias de carregamento das baterias dos VEs conforme já foi descrito anteriormente.

4.1.4 - Cálculo da Carga Associada aos Veículos Elétricos

A carga associada aos VEs é determinada a partir da estimativa do número de VEs e a estratégia de carregamento dos mesmos. Esta estimativa dá-se conforme a expressão (4.3). Segundo o *Work Package 2* do projeto MERGE [7] foram definidas quatro classes de VEs:

- L7e - veículos de quatro rodas com peso máximo sem carga de 400 kg para um veículo de passageiros ou 550 kg para um veículo de mercadorias e uma potência máxima líquida de 15kW independentemente do tipo de motor;
- M1 - veículo de passageiros de quatro rodas com até 8 lugares excluindo o lugar do condutor;
- N1 - veículo de transporte de mercadorias de quatro rodas com um peso máximo em carga de 3500 kg;
- N2 - veículo de transporte de mercadorias de quatro rodas com um peso máximo em carga de 3500 kg a 12.000 kg.

A carga dos VEs na hora t é calculada usando a seguinte equação:

$$P_{VE}(t) = \sum_{j=1}^M P_{VEj}(t) \times N_j(t) \times C_j(t) \quad (4.3)$$





onde, $P_{VE}(t)$ é a carga do VE na hora t , $N_j(t)$ é o número de VEs em modo de carregamento na hora t ; P_{VE} e $C_j(t)$ é um fator de carregamento dos VEs. , M representa as diferentes classes j de VEs e j representa uma determinada classe M .

Deste modo a carga dos VEs é agregada à carga convencional do sistema resultando na carga equivalente, $L_{EQ}(t)$ dada pela expressão:

$$L_{EQ}(t) = P_L(t) + P_{VE}(t) \quad (4.4)$$

onde $P_L(t)$ é a carga convencional na hora t e $P_{VE}(t)$ é a carga dos VEs na hora t . A tabela 4-3 apresenta as diferentes classes de VEs e as características técnicas dos mesmos.

Tabela 4-3 - Características das diferentes classes de VEs.

VE					
Tipo		L7e	M1	N1	N2
Descrição		Quadriciclo com peso máximo sem carga de 400 kg ou 550 kg	Veículo de passageiros com o máximo de 8 lugares mais o lugar do condutor	Veículo de transporte de mercadorias com um peso máximo de 3500 kg	Veículo de transporte de mercadorias com um peso máximo em carga de 3500 kg a 12.000 kg
Capacidade das baterias para efeitos de simulação	Tecnologia	BEV / PbA (possivelmente será substituída pela tecnologia Li-ion)	BEV / Li-ion	BEV / Li-ion	BEV / Li-ion e Zebra (será substituída pela tecnologia Li-ion)
	Máximo	15 kWh	72 kWh	40 kWh	120 kWh
	Média	8.7 kWh	29 kWh	23 kWh	85 kWh
Taxas de carregamento das baterias (kW/hora)	Mínimo	3 kWh	10 kWh	9.6 kWh	51 kWh
	Taxa de carregamento	de 3kW (valor standard) a 7.5 kW	de 3kW a 240kW	de 10kW a 5kW	de 35kW a 60kW
	Máximo	3kW	8.8kW	3.3kW	-
	Média	3kW	3kW	3kW	10 kW
	Mínimo	1kW	2kW	1.3kW	-

A próxima secção apresentará a proposta da utilização do modelo dos VEs para construção das distribuições de chegadas, ao longo do dia, dos mesmos. De seguida apresenta algumas das distribuições utilizadas no sistema teste que estão de acordo com o cenário de VEs previsto para o ano de 2020 em Portugal [20].

4.1.5 - Construção das distribuições de chegadas de VEs para análise em regime permanente - trânsito de potência probabilístico

Esta secção tem como objetivo apresentar uma proposta de utilização do modelo de VEs descrito anteriormente para gerar informações relacionadas com a utilização de veículos elétricos para a análise do trânsito de potências probabilístico, na análise do sistema de energia elétrica em regime permanente. Para tal, um trânsito de potência probabilístico foi desenvolvido sobre a plataforma jPowerFlow, que é uma ferramenta desenvolvida no INESC Porto e composta por diversos aplicativos de análise em regime permanente que diferenciam-se conceitualmente entre si, por adicionar diferentes vertentes de incertezas neste tipo de análise. Neste momento a plataforma jPowerFlow conta com os seguintes aplicativos:

- Trânsito de potência determinístico;
- Trânsito de potência difuso clássico;
- Trânsito de potência difuso simétrico;
- Trânsito de potência probabilístico.

Utilizando o conceito da simulação Cronológica com base no processo de Poisson para obter uma melhor representação do comportamento estocástico do carregamento das baterias dos VEs, é possível obter distribuições horárias da potência relativa ao número de VEs que estão a chegar/carregar ao longo do dia num determinado ponto do sistema de distribuição e que poderá estar conectado a um barramento do sistema de transporte. A figura 4-4 apresenta a distribuição na hora 12 de um dia com 24 horas para barramentos do sistema teste, com PC ou EC.

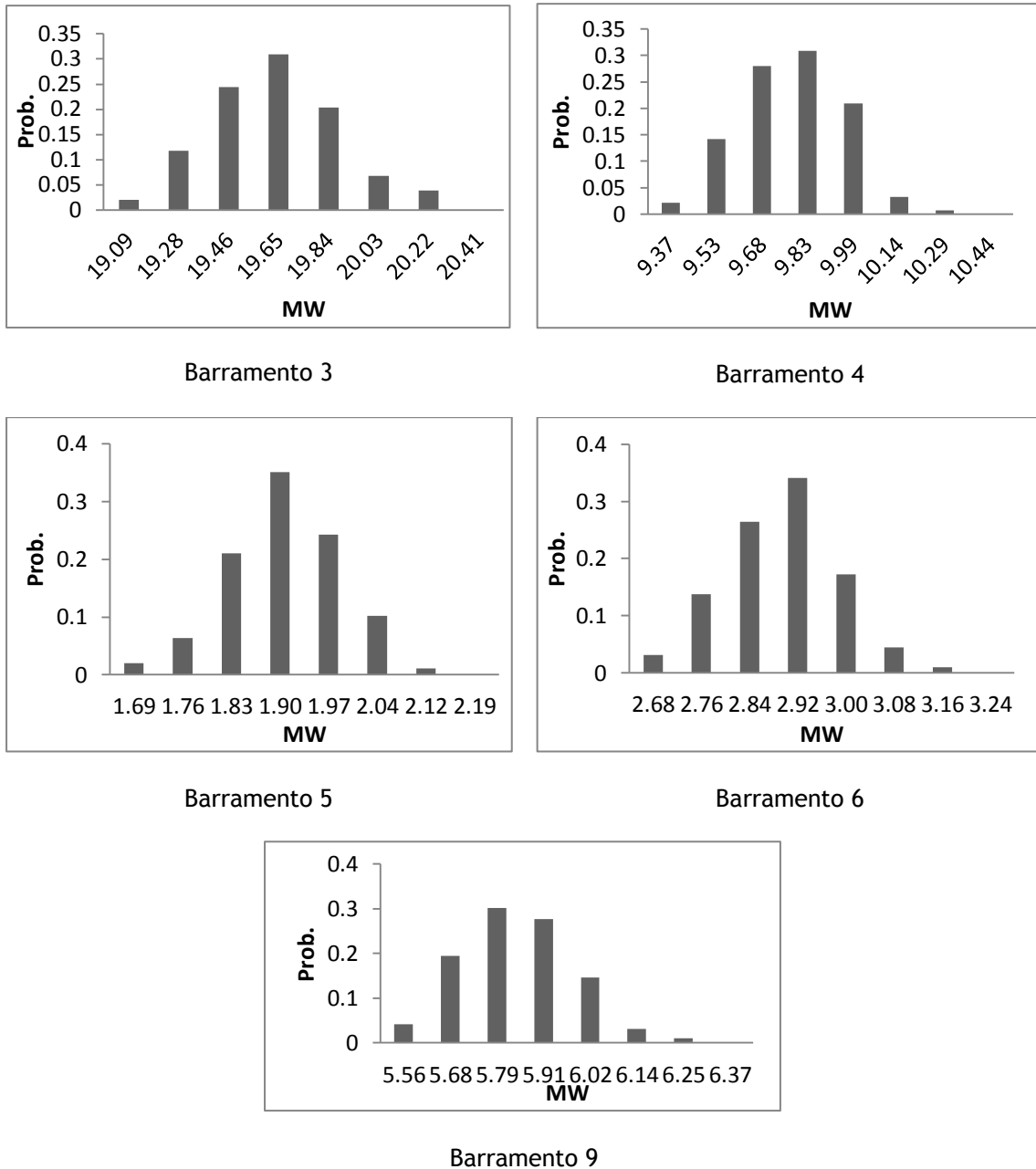


Figura 4-3 - Distribuições da potência associada ao carregamento dos VEs.

A figura 4-3 apresenta as distribuições utilizadas no sistema teste para a análise do sistema em regime permanente. Podemos salientar que as distribuições de probabilidade têm uma forma similar, já que foram geradas a partir da mesma hora do dia, o que justifica a semelhança no comportamento. Entretanto, a potência difere já que cada uma das distribuições representa um barramento do sistema e, portanto, diferentes cenários de veículos foram utilizados. A tabela 4-4, apresenta os cenários de VEs para cada barramento do sistema teste com PC ou EC.

Tabela 4-4 - Número de chegada de veículos para cada barramento, com PC ou EC.

Barramento	Número de VEs
3	20 000
4	10 000
5	2 000
6	3 000
9	6 000

As distribuições da carga dos VEs aqui apresentadas foram obtidas a partir de amostras da simulação, observando o comportamento aleatório das chegadas dos VEs ao longo do dia. No final da simulação estas observações foram utilizadas para construir as distribuições apresentadas na Figura 4-3. O próximo capítulo apresenta os resultados obtidos a partir do sistema teste IEEE 14 barramentos considerando como dado de entrada as distribuições obtidas através do modelo descrito neste capítulo. Os dados referentes ao sistema teste são apresentados no anexo A.

Capítulo 5

Resultados

Este capítulo apresenta os estudos da aplicação da metodologia proposta nos capítulos 3 e 4. Para promover a discussão da metodologia utilizada, os estudos foram realizados no sistema teste do IEEE 14 barramentos, onde os parâmetros base estão apresentados no anexo A.

5.1 - Trânsito de potências, a partir de método convencional sem introdução de VEs

Com o objetivo de obter resultados de referência, foi realizada uma avaliação da rede teste de transporte caracterizando-a como caso base, onde não há VEs conectados a rede e, portanto, não há nenhum tipo de incerteza associada a carga do sistema. A tabela 5-1, apresenta os defasamentos e modulos das tensões nos barramentos do sistema teste.

Tabela 5-1 - Módulo e defasamento da tensão para cada barramento sem VEs.

Barr	Tensão	
	Defasamento (rad)	Modulo (p.u.)
1	0	1.06
2	-0.086960057	1.045
3	-0.222089071	1.01
4	-0.179997038	1.017698
5	-0.15313097	1.019532
6	-0.248177812	1.07
7	-0.233171385	1.061606
8	-0.233171385	1.09
9	-0.260724006	1.056103
10	-0.263516944	1.051194
11	-0.258223684	1.057199
12	-0.263888301	1.056566
13	-0.264627081	1.05086
14	-0.279870768	1.035841

A tabela 5-2 apresenta os trânsitos de potência ativa e reativa nas linhas do sistema teste.

Tabela 5-2 - Potência ativa e reativa para cada linha sem VEs.

Trânsitos de Potência nas linhas				
Linhas	Barr	Barr	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)
1	1	2	156.8785	-20.4033
2	1	5	75.5089	3.846802
3	2	3	73.23588	3.56037
4	2	4	56.13111	-1.5661
5	2	5	41.51416	1.160948
6	3	4	-23.2873	4.457335
7	4	5	-61.1646	15.84882
8	4	7	28.07666	-9.71041
9	4	9	16.08174	-0.45461
10	5	6	44.07753	12.47825
11	6	11	7.341334	3.409332
12	6	12	7.855436	1.899451
13	6	13	17.68076	6.859662
14	7	8	1.03E-13	-17.1122
15	7	9	28.07666	5.697302
16	9	10	5.238439	4.168028
17	9	14	9.419964	3.560139
18	10	11	-3.77434	-1.66592
19	12	13	1.685317	1.153514
20	13	14	5.650014	1.796471

Na próxima secção, os VEs são introduzidos no sistema e o impacto dos mesmos é avaliado utilizando o trânsito de potência determinístico.

5.2 - Trânsito de potências a partir do método convencional com introdução de VEs

Nesta avaliação, a carga referente aos VEs foi somada a carga convencional do sistema nos barramentos descritas na tabela 5-3.

Tabela 5-3 - Distribuição de carga de VEs pelos barramentos.

Barr.	VEs	Barr.	VEs
1	x	8	x
2	x	9	✓
3	✓	10	x
4	✓	11	x
5	✓	12	x
6	✓	13	x
7	x	14	x

Os resultados do trânsito de potência determinístico com introdução dos VEs são apresentados nas tabelas 5-4 e 5-5, para defasamentos e módulos das tensões e trânsito de potências respectivamente.

Tabela 5-4 - Módulo e defasamento da tensão para cada barramento com VEs sem incerteza.

Tensão		
Barr.	Defasamento (rad)	Módulo (p.u.)
1	0.00000	1.06
2	-0.00184	1.045
3	-0.00470	1.01
4	-0.00373	1.013825
5	-0.00317	1.01592
6	-0.00500	1.07
7	-0.00476	1.059284
8	-0.00476	1.09
9	-0.00529	1.053444
10	-0.00533	1.048939
11	-0.00521	1.05599
12	-0.00528	1.056401
13	-0.00530	1.050419
14	-0.00560	1.034104

Conforme se pode verificar nas tabelas 5-1 e 5-4 os módulos das tensões e defasamentos, nos barramentos onde a carga associada aos VEs foram ligadas, diminuíram, assim como nos outros barramentos do sistema. Nos barramentos 3 e 6 não se verifica esta diminuição uma vez que são barramentos que possuem baterias de condensadores. Esta diminuição deve-se ao aumento da carga do sistema. Este efeito nos módulos das tensões pode ser observado na figura 5-1.

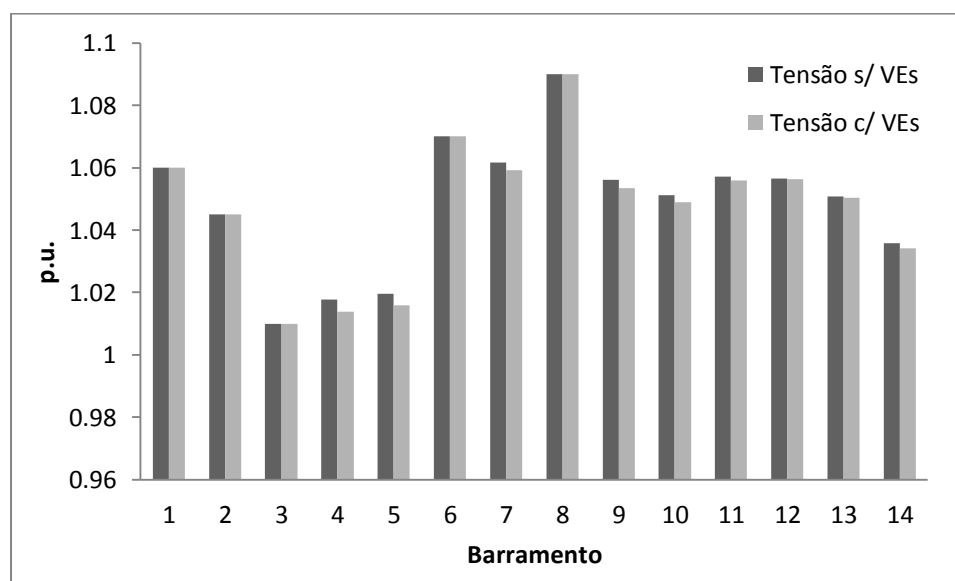


Figura 5-1 - Comparação do módulo das tensões nos barramentos para o cenário sem VEs e com VEs.

A tabela 5-5 apresenta o trânsito de potência ativa e reativa para a avaliação do sistema teste com integração de VEs.

Tabela 5-5 - Potência ativa e reativa para cada linha com VEs sem incerteza.

Trânsitos de Potência nas linhas				
Linhas	Barr.	Barr	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)
1	1	2	188.9225	-27.58002915
2	1	5	88.98582	4.57028772
3	2	3	88.0595	2.31854212
4	2	4	65.22976	-1.344842444
5	2	5	47.67257	1.745674708
6	3	4	-29.1518	9.425928398
7	4	5	-72.8324	19.32077446
8	4	7	30.80922	-10.3250036
9	4	9	17.63046	-0.565848789
10	5	6	48.55636	11.22319645
11	6	11	8.299407	3.611412243
12	6	12	7.986772	1.907172586
13	6	13	18.18059	6.975297354
14	7	8	1.08E-13	-18.47103827
15	7	9	30.80922	6.091398645
16	9	10	4.297482	4.001741605
17	9	14	8.802119	3.46103837
18	10	11	-4.7124	-1.824514467
19	12	13	1.814388	1.156520092
20	13	14	6.266727	1.892073898

A partir das tabelas 5-3 e 5-5, pode-se observar o aumento no trânsito de potência das linhas referentes aos barramentos onde a carga associada aos VEs foi adicionada. Pode-se notar que o maior aumento verifica-se entre o barramento 2 e 3. Isto deve-se ao facto do barramento 3 ter um aumento significativo de carga, devido a integração de VEs, e o barramento 2 possuir geração.

A figura 5-2 apresenta uma comparação entre os trânsitos de potência ativa para o sistema teste, com e sem a integração dos VEs.

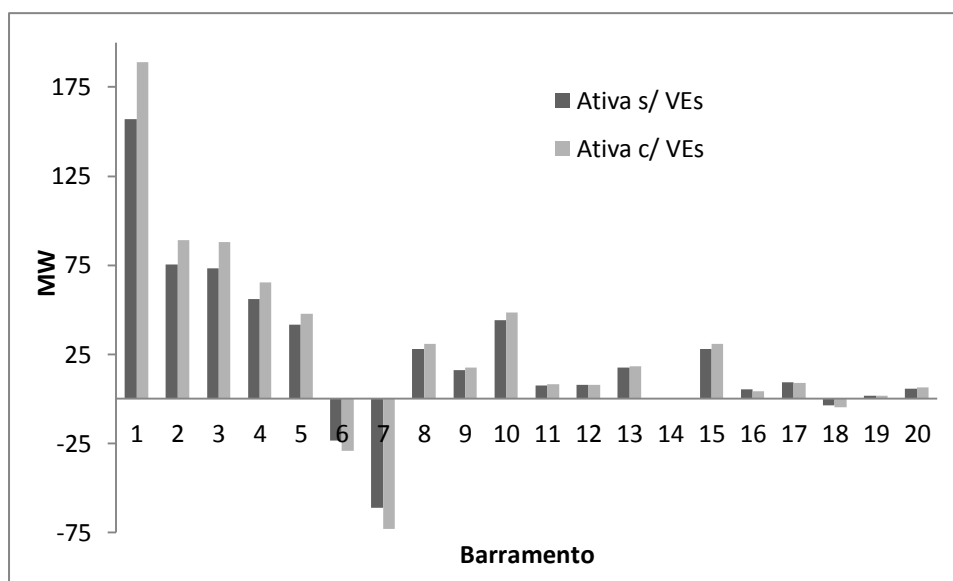


Figura 5-2 - Trânsito de potência ativa nas várias linhas para o cenário sem VEs e com VEs.

A próxima secção apresenta os resultados da resolução do trânsito de potências probabilístico, considerando a integração de VEs no sistema teste.

5.3 - Trânsito de potências a partir do método probabilístico com introdução da incerteza na carga dos VEs

Nesta secção, a incerteza relacionada a carga dos VEs é representada conforme modelo apresentado no capítulo 4. A distribuição da carga dos VEs, para cada barramento especificado na tabela 5-3, é parâmetro de entrada para o método de trânsito de potências probabilístico desenvolvido ao longo desta dissertação.

A figura 5-3 apresenta os módulos das tensões dos barramentos 4 e 6. Verifica-se, considerando os módulos das tensões apresentados nas tabelas 5-2 e 5-4, a coincidência dos valores esperados, com uma pequena variação devido a introdução de incertezas relacionadas aos VEs. Este resultado permite observar as probabilidades associadas aos valores dos módulos das tensões dos barramentos do sistema. Neste exemplo, verifica-se que há variação de valores das tensões com probabilidades muito próximas. Estas informações são importantes para este tipo de estudo, podendo-se concluir que este tipo de metodologia contribui para uma avaliação mais específica da rede em regime permanente. Neste caso, não há grandes variações nos valores das tensões, entretanto, esta é uma rede teste que não tem grande dimensão e, portanto, estes resultados podem ter maior variação em redes maiores com maior número de barramentos PQ.

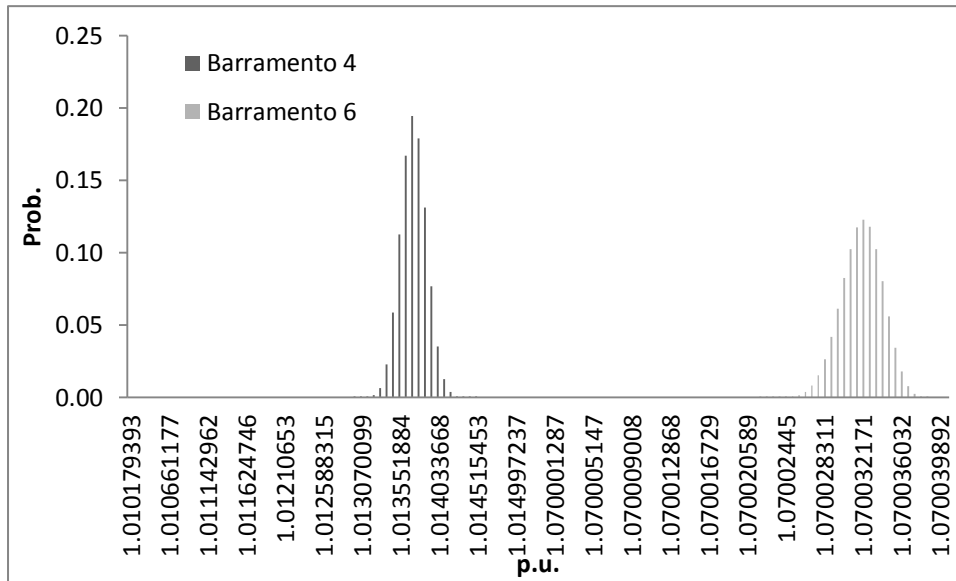


Figura 5-3 - Módulo da tensão nos barramentos 4 e 6.

A figura 5-4, apresenta a linha 1 que liga os barramentos 1 e 2. Verifica-se nesta, uma variação de aproximadamente 2 MW nos valores encontrados. Mais uma vez, este tipo de metodologia permite fazer uma avaliação dos resultados que podem ocorrer permitindo ajudar nas tomadas de decisão do operador do sistema.

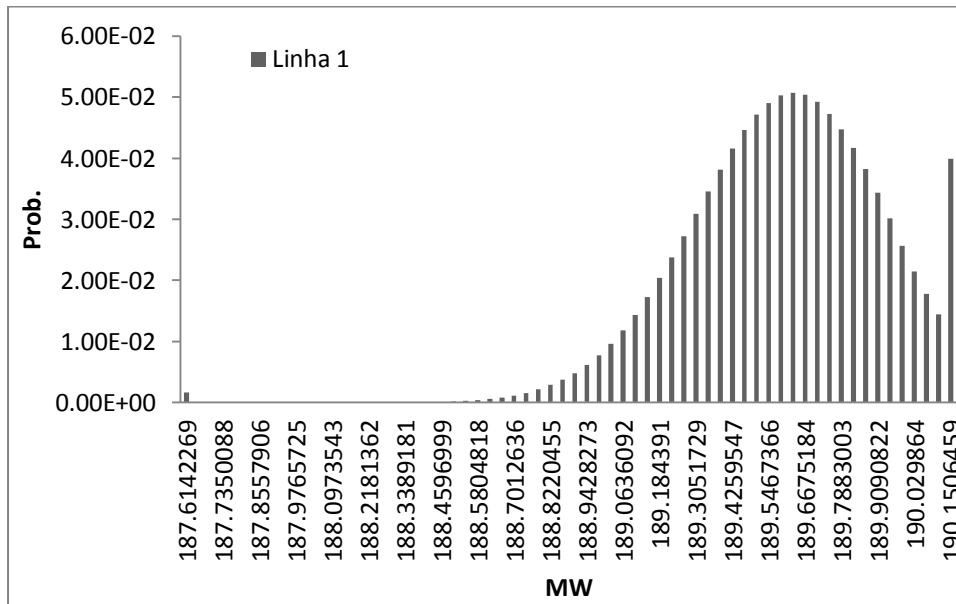


Figura 5-4 - Transito de potência ativa na linha 1.

A figura 5-5 apresenta o trânsito de potência ativa entre os barramentos 2 e 3. Analogamente às tensões, o trânsito de potência ativa entre estes barramentos apresenta um valor esperado equivalente ao valor apresentado na tabela 5-5, entretanto, as variações entre os resultados obtidos apresentam pequenas diferenças nas probabilidades. Verifica-se

também um aumento do trânsito de potência em relação ao resultado apresentado na tabela 5-3 devido ao aumento significativo da carga associada aos VEs.

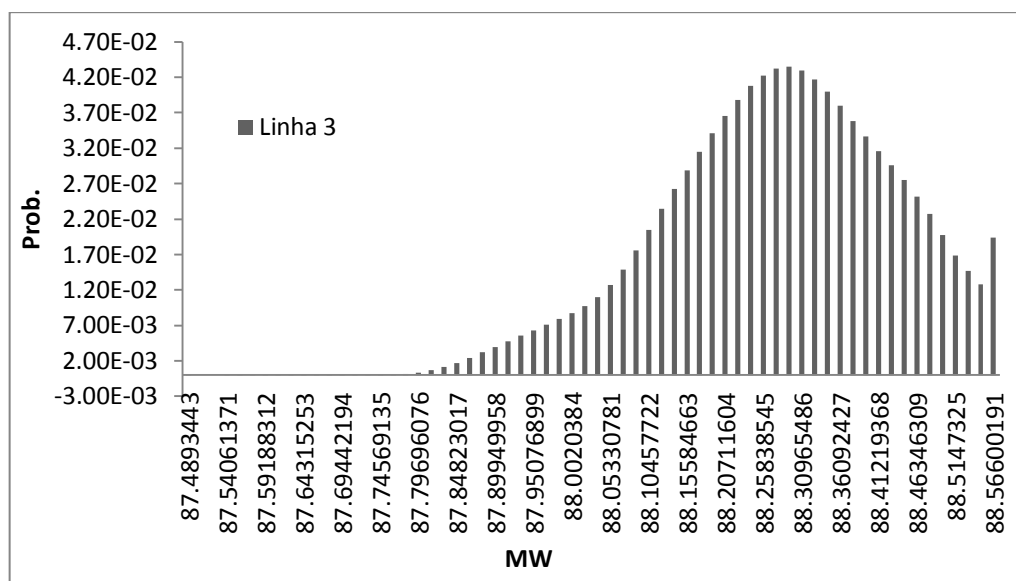


Figura 5-5 - Transito de potência ativa na linha 3.

A Figura 5-6 apresenta o trânsito de potência da Linha 6 que conecta os barramentos 3 e 4 onde ambos possuem carga associada aos VEs. Apesar de ligar dois barramentos que possuem incerteza associada à carga dos VEs existe um pequeno intervalo de variação da potência tal como acontece na linha 1 e 3.

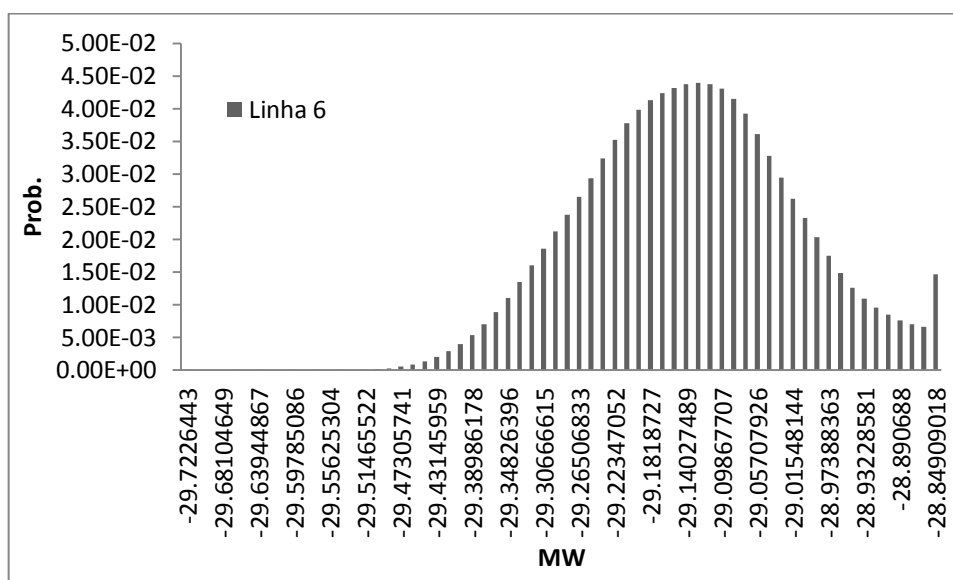


Figura 5-6 - Transito de potência ativa na linha 6.

Apesar de não terem sido feitas considerações relativas a tempos computacionais no capítulo 3, é importante salientar que o esforço computacional requerido nesta análise, realizada num computador com processador intel® core™ i5 com 4GB de memória RAM, foi de aproximadamente 7 segundos. Este tempo aumentará com o aumento da complexidade da

rede a ser avaliada bem como o número de pontos considerados na distribuição de probabilidade.

No capítulo seguinte são apresentadas algumas conclusões sobre os resultados obtidos e algumas propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo serão apresentadas algumas conclusões obtidas ao longo do trabalho desenvolvido assim como possíveis trabalhos futuros.

6.1 - Conclusões

Como demonstrado no capítulo 2, a penetração dos VEs deverá aumentar nos próximos anos. Deste modo, é necessário realizar estudos que viabilizem os possíveis melhoramentos nas redes de transporte de modo a integrar a elevada quantidade de VEs. Estes estudos devem ter em conta a incerteza inerente a representação da carga associada aos VEs.

De acordo com uma das *research questions* abordadas no capítulo 1, este trabalho apresenta uma aplicação do trânsito de potência probabilístico considerando incertezas na carga provenientes dos VEs. Esta metodologia analítica permite avaliar o estado em regime permanente do sistema de transporte, revelando-se mais adequada para sua aplicação em redes de transporte com tamanho significativos dada sua eficiência computacional, conforme discutido no capítulo 3.

Neste trabalho apresentou-se um exemplo baseado numa rede teste com o objetivo de demonstrar a performance da metodologia proposta no capítulo 3. Como comentado no capítulo 5, esta metodologia revelou-se rápida e apresentou soluções que foram validadas a partir do estudo de trânsito de potência determinístico. Por outro lado, apesar de a rede não ter dimensões semelhantes a uma rede real, levando a um impacto pouco significativo da penetração de VEs, o estudo realizado foi ilustrativo da metodologia proposta.

6.2 - Trabalho Futuro

A representação de incertezas para estudos em regime permanente nas redes de transporte tem sido alvo de investigação nos últimos anos. As abordagens probabilísticas, tal como utilizadas neste trabalho, estão bastante associadas à informação estatística. Por outro lado, a representação difusa das incertezas pode ser também uma boa alternativa quando a natureza da informação é não estocástica. Como continuidade deste trabalho, é proposta uma comparação entre o trânsito de potências probabilístico e o trânsito de potências difuso na avaliação da rede de transporte considerando um elevado grau de penetração dos VEs.

Para verificar de forma mais evidente o impacto das incertezas da carga de veículos elétricos, é proposta uma avaliação semelhante a uma rede de distribuição, e também a consideração de limites de linhas.

Referências

- [1] International Energy Agency., ‘Technology Road Map Electric and plug-in hybrid electric vehicles (EV/PHEV)’, 2009.
- [2] Department for Business Enterprise & Regulatory Reform: Department for Transport, ‘Investigation into Scope for the Transport Sector to Switch to Electric Vehicles and Plug-in Hybrid Vehicles’, United Kingdom, October 2008.
- [3] Mayor of London, ‘London’s Electric Vehicle Infrastructure Strategy’, December 2009.
- [4] J. A. Peças Lopes, P. M. Rocha Almeida, F. J. Soares, N. Hatziargyriou, “Electric Vehicles Grid Integration Under the MicroGrid Concept”, Smart Grids and Mobility - Smart Grids and Mobility, Würzburg, Germany, June, 2009.
- [5] EDP: <http://www.edp.pt>, sustentabilidade-> I&D + Inovação-> Carros Eléctricos -> Veículos Eléctricos -> Veículos Eléctricos, acedido em 14/12/2011.
- [6] J. A. Peças Lopes¹, F. J. Soares¹, P. M. Almeida¹, M. Moreira da Silva: ‘Smart Charging Strategies for Electric Vehicles: Enhancing Grid Performance and Maximizing the Use of Variable Renewable Energy Resources’ Stavanger, Norway, May 13-16, 2009.
- [7] Peças Lopes, J.A, Soares, F.J., Rocha Almeida, P.M., ‘Identifying Management Procedures to Deal with Connection of Electric Vehicles in the Grid’, *IEEE PowerTech Bucharest*, 2009.
- [8] Manuel António Matos: ‘Introdução ao Trânsito de potências’ Apointamentos para a disciplina de Sistemas Eléctricos de Energia I, FEUP 1999.
- [9] F. Maciel Barbosa: ‘O trânsito de potências em sistemas eléctricos de energia.’ Apointamentos para a disciplina de RESEE, FEUP 2006.
- [10] João Tomé Saraiva Janeiro: ‘Algoritmos de Fuzzy Power Flow e Aplicações’ FEUP 2000.

[11] Betina Baère de Faria Campos Neves, 'Comparação de Modelos Probabilísticos e Difusos na Modelização de Incertezas em Estudos de Fluxos de Potência' FEUP, Dissertação para obtenção de grau de Mestre em EEC, Setembro de 2002.

[12] P.Chen, Z.Chen, B, Blak-Jensen, 'Probabilistic Load Flow: A Review', DPTR2008 6-9 April 2008.

[13] ALLAN, R.N., BORKOWSKA, B., and GRIGG, C.H.: 'Probabilistic analysis of power flows', *Proc. IEE*, 1974, 121, (12), pp. 1551-1556.

[14] Allan R.N. , and Leite da Silva A. M. : 'Probabilistic load flow using multilinearisations ', *IEE proc*,1981, 128(5), pp.280-287

[15] SANTOS, MARCELO JOS´E DOS 'Modelagem de Incertezas no Problema de Fluxo de Potência' [Rio de Janeiro] 2008 XVIII, 236 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,D.Sc., Engenharia Elétrica, 2008) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

[16] Leite da Silva A. M., and Arient : ' Probabilistic load flow by a multilinear simulation algorithm ' *IEE PROCEEDINGS*, Vol. 137, Pt. C, No. 4, JULY 1990.

[17] Allan R.N. , and Leite da Silva A. M., R.C. Burchett : ' Evaluation methods and accuracy in probabilistic load flow solutions ', *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, vol. Pas-100, No5, May 1981.

[18] R.N. Allan, A.M. Leite da Silva, A.A. Abu-Nasser, R.C. Burchett, 'Discrete Convolution in Power System Reliability' *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY*, VOL. R-30, NO. 5, DECEMBER 1981.

[19] Instituto de Estatística Português. Inquérito à Mobilidade da População Residente 2000. Direção Geral de Transportes Terrestres. Porto. Portugal. 2002.

[20] MERGE Project is a European project supported within the Seventh Framework Programme for Research and Technological Development with contract No: 241399.

[21] Bremermann, Leonardo E., "Impact Evaluation of the Large Scale Integration of Electric Vehicles in the Security of Supply", Ph.D. Thesis Progress Report, Oct. 2011.

[22] D. D. Pestana e S. F. Velosa, *Introdução à Probabilidade e à Estatística*, 3ª ed.: Fundação Calouste Gulbenkian, vol. 1, 2008.

[23] R. Y. Rubinstein e D. P. Kroese, *Simulation and the Monte Carlo method*, 2ª ed.: John Wiley & Sons, Inc., 2008.

Anexo A - Descrição dos Sistemas Teste

Rede de teste de 6 barramentos usada para verificação da metodologia de trânsito de potências probabilístico usada:

Classificação de barramentos:

Tabela A-1 - Classificação dos barramentos.

Bus	Classificação	Tensão	Argumento
1	Ref	1	0
2	PQ	-	-
3	PQ	-	-
4	PQ	-	-
5	PQ	-	-
6	PV	1	-

Características das linhas:

Tabela A-2 - Características das linhas.

Bus		Linha	Características da rede		
From	To	n°	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)
1	2	1	0.723	1.05	0.01
1	2	2	0.6	0.9	0.009
1	5	3	0.282	0.64	0.003
3	4	4	0.097	0.407	0.0575
6	3	5	0.08	0.37	0.05
6	4	6	0.123	0.518	0.0915
2	3	7	0	0.3	0
4	5	8	0	0.133	0

Rede de teste IEEE 14 barramentos usada para aplicação do trânsito de potências com incerteza associada aos VEs.

A figura A-1 apresenta a topologia da rede:

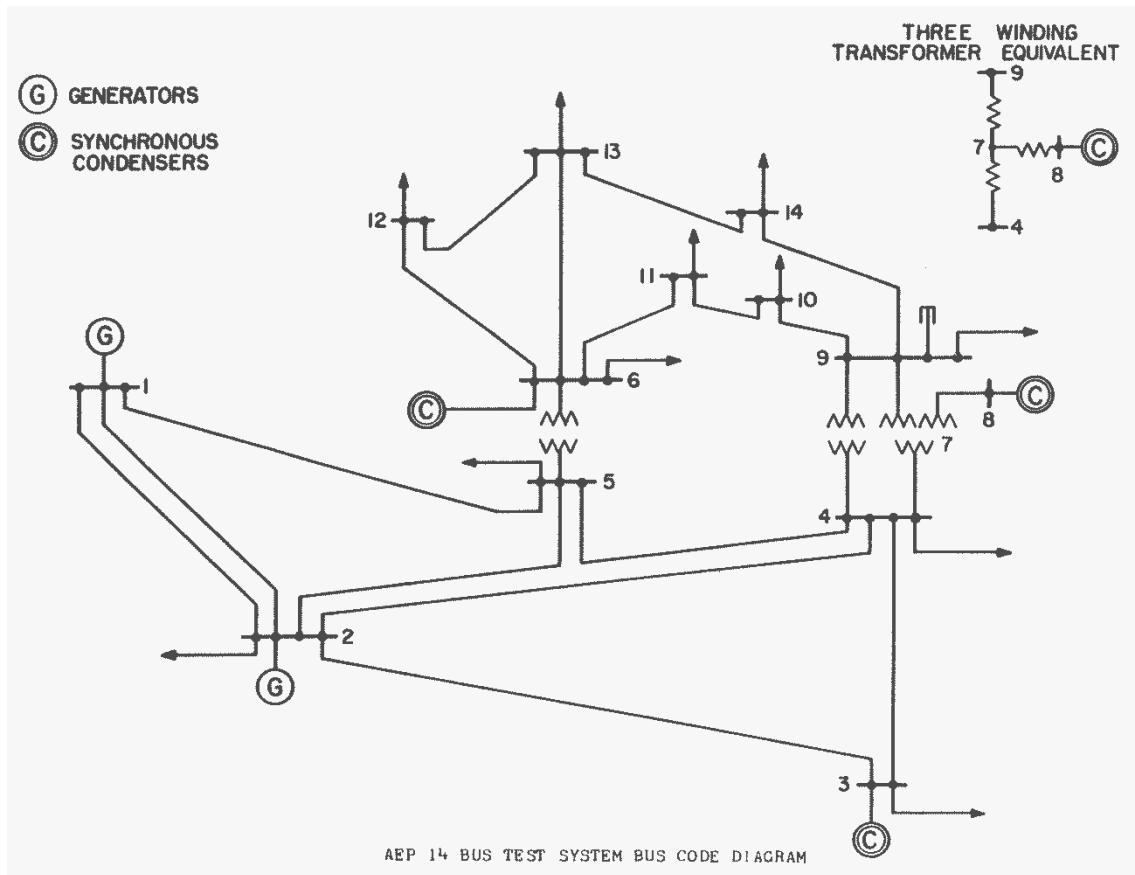


Figura A-1 - Topologia da rede de 14 barramentos.

A tabela A-3 apresenta os dados de entrada necessários para a realização de trânsito de potências e as suas características.

Tabela A-3 - Características da rede de teste IEEE 14 barramentos.

08/19/93 UW ARCHIVE 100 1962 W IEEE 14 Bus Test Case

BUS DATA	FOLLOWS	14	ITEMS							
1	Bus	1	HV	1	1	3	1.06	0	0	0
2	Bus	2	HV	1	1	2	1.045	-4.98	21.7	12.7
3	Bus	3	HV	1	1	2	1.01	-12.72	94.2	19
4	Bus	4	HV	1	1	0	1.019	-10.33	47.8	-3.9
5	Bus	5	HV	1	1	0	1.02	-8.78	7.6	1.6
6	Bus	6	LV	1	1	2	1.07	-14.22	11.2	7.5
7	Bus	7	ZV	1	1	0	1.062	-13.37	0	0
8	Bus	8	TV	1	1	2	1.09	-13.36	0	0
9	Bus	9	LV	1	1	0	1.056	-14.94	29.5	16.6
10	Bus	10	LV	1	1	0	1.051	-15.1	9	5.8
11	Bus	11	LV	1	1	0	1.057	-14.79	3.5	1.8
12	Bus	12	LV	1	1	0	1.055	-15.07	6.1	1.6
13	Bus	13	LV	1	1	0	1.05	-15.16	13.5	5.8
14	Bus	14	LV	1	1	0	1.036	-16.04	14.9	5
BUS DATA	FOLLOWS	232.4	-16.9	0	1.06	0	0	0	0	0

1	Bus	40	42.4	0	1.045	50	-40	0	0	0
2	Bus	0	23.4	0	1.01	40	0	0	0	0
3	Bus	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Bus	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Bus	0	12.2	0	1.07	24	-6	0	0	0
6	Bus	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Bus	0	17.4	0	1.09	24	-6	0	0	0
8	Bus	0	0	0	0	0	0	0	0.19	0
9	Bus	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	Bus	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Bus	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Bus	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Bus	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	Bus									
-999										
BRANCH DATA	FOLLOWS	20	ITEMS							
1	2	1	1	1	0	0.01938	0.05917	0.0528	0	
1	5	1	1	1	0	0.05403	0.22304	0.0492	0	
2	3	1	1	1	0	0.04699	0.19797	0.0438	0	
2	4	1	1	1	0	0.05811	0.17632	0.034	0	
2	5	1	1	1	0	0.05695	0.17388	0.0346	0	
3	4	1	1	1	0	0.06701	0.17103	0.0128	0	
4	5	1	1	1	0	0.01335	0.04211	0	0	
4	7	1	1	1	0	0	0.20912	0	0	
4	9	1	1	1	0	0	0.55618	0	0	
5	6	1	1	1	0	0	0.25202	0	0	
6	11	1	1	1	0	0.09498	0.1989	0	0	
6	12	1	1	1	0	0.12291	0.25581	0	0	
6	13	1	1	1	0	0.06615	0.13027	0	0	
7	8	1	1	1	0	0	0.17615	0	0	
7	9	1	1	1	0	0	0.11001	0	0	
9	10	1	1	1	0	0.03181	0.0845	0	0	
9	14	1	1	1	0	0.12711	0.27038	0	0	
10	11	1	1	1	0	0.08205	0.19207	0	0	
12	13	1	1	1	0	0.22092	0.19988	0	0	
13	14	1	1	1	0	0.17093	0.34802	0	0	
BRANCH DATA	FOLLOWS	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	5	0	0	0	0.978	0	0	0	0	0
4	7	0	0	0	0.969	0	0	0	0	0
4	9	0	0	0	0.932	0	0	0	0	0

