

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Escalonamento e Pré-Despacho incluindo
Produção Eólica**

José Luís Monteiro Meirinhos

VERSÃO FINAL

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

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

Julho de 2010

© José Luís Monteiro Meirinhos, 2010

Resumo

As energias de fonte renovável como a energia eólica são descritas como sendo fontes de energia intermitente.

A consideração da produção eólica durante o processo de escalonamento das máquinas térmicas obriga a considerar o risco associado à volatilidade do recurso, a volatilidade ou incerteza de produção eólica é representada por cenários de produção. Tendo a potência eólica instalada aumentado significativamente nos últimos anos, isto pode causar alguns problemas associados à optimização do escalonamento e pré-despacho, bem como o cumprimento de todos os limites técnicos.

Nesta dissertação é descrito o desenvolvido um programa que realiza o escalonamento e pré-despacho de unidades térmicas através de programação dinâmica com inclusão da incerteza da produção eólica. Por fim, são simulados vários casos com diferentes previsões de produção eólica e níveis de reserva de modo a analisar a influência da incerteza de produção eólica no escalonamento e pré-despacho.

Palavras-chave

Escalonamento e pré-despacho, programação dinâmica, incerteza de produção eólica.

Abstract

The energy from renewable sources like wind power are described as intermittent sources of energy.

By considering wind power production for the unit commitment process of thermal units, it becomes necessary to take into account the risk associated with the volatility of the resource. The volatility or uncertainty of wind generation is represented by different production scenarios. The fact that the installed wind power has increased significantly in the last years can cause a few problems associated with the optimization of unit commitment and economic dispatch as well as technical limits execution.

In this dissertation it is developed a program that performs the unit commitment and dispatch of thermal units using dynamic programming that takes into consideration wind power uncertainty. In this context, different cases were simulated, varying wind production forecasts and reserve levels, in order to analyze the influence of the uncertainty of wind power production in unit commitment and pre-dispatch.

Keywords

Unit commitment, dynamic programing, variability of wind power.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor Manuel António Cerqueira da Costa Matos, pelo apoio, dedicação e conselhos sempre prestados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Quero enviar uma palavra de agradecimento e um forte abraço a todos os meus amigos, sem excepção, por toda a amizade, apoio, coragem, pelos momentos de diversão e alegria que vivemos.

E como os últimos são os primeiros, quero agradecer a toda a minha família, especialmente aos meus pais e irmão por toda a confiança que em mim depositaram, pelo carinho e apoio sempre presentes ao longo deste percurso académico e em toda a minha vida. Pai, Mãe e Manaia é com grande satisfação que vos dedico esta dissertação.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Índice	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xiii
Abreviaturas e Símbolos	xv
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 - Enquadramento	1
1.2 - Motivação	3
1.3 - Objectivos.....	4
1.4 - Estrutura da dissertação.....	5
1.5 - Ferramentas utilizadas no desenvolvimento do trabalho	6
Capítulo 2	7
Influência da incerteza de produção eólica no escalonamento e pré-despacho	7
2.1 - Introdução	7
2.2 - O problema	8
2.3 - Escalonamento (<i>unit commitment</i>) e pré-despacho	9
2.3.1- Métodos de resolução	10
2.3.2- Custos de produção dos grupos térmicos.....	11
2.3.3- Restrições de potência gerada.....	13
2.4 - Programação dinâmica para o problema do escalonamento	14
2.5 - Previsão de produção eólica	16
2.6 - Impacto da incerteza de produção eólica no escalonamento e pré-despacho	18
Capítulo 3	21
Metodologia utilizada no estudo	21
3.1 - Introdução	21
3.2 - Descrição da metodologia	21
3.3 - Etapas do projecto	22
3.4 - Escalonamento e pré-despacho com programação dinâmica	23

3.4.1- Notação utilizada	24
3.4.2- Estados possíveis	24
3.4.3- Escalonamento e pré-despacho óptimo	25
3.4.4- Modelo matemático	27
3.4.5- Escolha da melhor trajectória	28
3.5 - Construção de indicadores de ajuda à decisão	28
3.6 - Ajuda à decisão da melhor alternativa de escalonamento	30
3.6.1- Modelo 1.....	30
3.6.2- Modelo 2.....	32
3.7 - Implementação da metodologia apresentada.....	32
Capítulo 4	33
Apresentação e Análise dos Resultados	33
4.1 - Caso de estudo 1.....	33
4.1.1- Dados de entrada	34
4.1.2- Resultados obtidos.....	35
4.1.3- Ajuda à decisão	37
4.2 - Caso de estudo 2.....	38
4.2.1- Dados de entrada	38
4.2.2- Resultados obtidos.....	40
4.2.3- Ajuda à decisão	42
4.2.3.1 - Modelo 1	42
4.2.3.2 - Modelo 2	43
4.2.4- Alterando o nível de reserva.....	44
4.2.5- Resultados obtidos.....	44
4.2.6- Ajuda à decisão	45
4.2.6.1 - Modelo 1	45
4.2.6.2 - Modelo 2	46
4.3 - Influência dos níveis de reserva	47
Capítulo 5	53
Conclusões.....	53
5.1 - Conclusões Gerais	53
5.2 - Trabalhos futuros.....	54
Referências	56
Anexos.....	60

Lista de figuras

Figura 1.1 - Evolução anual das formas de produção de energia em Portugal [1].....	2
Figura 1.2 - Diagrama de cargas (16 de Junho 2010) [1].	3
Figura 1.3 - Diagrama de produção eólica (16 de Junho 2010) [1].....	4
Figura 2.1 - Diagrama de barramento único.	8
Figura 2.2 - Esquematização do problema do <i>Unit Commitment</i> e pré-despacho [3].	9
Figura 2.3 - Função custo de funcionamento [2].	11
Figura 2.4 - Custo de arranque de centrais com turbina a vapor [2].	12
Figura 2.5 - Exemplo gráfico de programação dinâmica [4].	15
Figura 2.6 - Exemplo gráfico com diferentes horizontes temporais de previsão de produção eólica [27].....	17
Figura 2.7 - Exemplo gráfico com diferentes cenários de produção eólica [28].	18
Figura 3.1 - Fluxograma das principais etapas.	22
Figura 3.2 - Fluxograma para a programação dinâmica do tipo “ <i>forward</i> ”	23
Figura 3.3 - Estados e transições entre períodos [2].	28
Figura 3.4 - Passos base para a construção dos indicadores.	29
Figura 3.5 - Resumo dos níveis hierárquicos que devem ser seguidos.....	31
Figura 4.1 - Apresentação gráfica da carga em cada período	40
Figura 4.2 - Apresentação gráfica dos cenários de produção eólica em cada período.....	40
Figura 4.3 - Evolução dos custos finais de despacho para cada alternativa.	48
Figura 4.4 - Evolução do corte de carga médio para cada alternativa.	48
Figura 4.5 - Evolução do desperdício médio para cada alternativa.....	49
Figura 4.6 - Evolução do custo médio de redespacho para cada alternativa.....	50

Figura 4.7 - Evolução número de situações em há desperdício de eólica para cada alternativa. 51

Figura 4.8 - Evolução número de cenários em há corte de carga para cada alternativa..... 52

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Matriz modelo para selecção das combinações possíveis - Matriz A.	25
Tabela 3.2 – Modelo da matriz para o escalonamento e custo da função $F(i,j)$ - Matriz F ...	27
Tabela 4.1 – Grupos Produtores	34
Tabela 4.2 – Carga (MW) e produção eólica (MW) para os diferentes cenários	34
Tabela 4.3 – Condições anteriores (iniciais)	34
Tabela 4.4 – Valores de reserva	34
Tabela 4.5 – Valores para o escalonamento e despacho em cada período e o custo associado	35
Tabela 4.6 – Corte de Carga (MW)	36
Tabela 4.7 – Desperdício de eólica (MW)	36
Tabela 4.8 – Custo de redespacho ($k\$$)	36
Tabela 4.9 – Arrependimento em relação ao custo de redespacho (\$)	37
Tabela 4.10 – Grupos Produtores.....	38
Tabela 4.11 – Carga (MW) e produção eólica (MW) para os 7 cenários, nos 24 períodos.	39
Tabela 4.12 – Condições anteriores (iniciais)	39
Tabela 4.13 – Valores de reserva.....	39
Tabela 4.14 – Corte de Carga (MW)	41
Tabela 4.15 – Desperdício de eólica (MW)	41
Tabela 4.16 – Custo de redespacho ($k\$$)	41
Tabela 4.17 – Arrependimento em relação ao custo de redespacho (\$)	42
Tabela 4.18 – Trade-offs.....	43

Tabela 4.19 – Custo equivalente à função V ($k\$$)	43
Tabela 4.20 – Valores de reserva	44
Tabela 4.21 – Corte de Carga (MW).....	44
Tabela 4.22 – Desperdício de eólica (MW).....	44
Tabela 4.23 – Custo de redespacho ($k\$$).....	45
Tabela 4.24 – Arrependimento em relação ao custo de redespacho (\$).....	46
Tabela 4.25 – Custo associado à função V ($k\$$)	46
Tabela 4.26 – Arrependimento em relação aos custos da função V (\$).....	47
Tabela A.1 – Escalonamento para o caso de estudo 2, reserva de 10% para a carga e 15% para a produção eólica.....	60
Tabela A.2 – Escalonamento para o caso de estudo 2, reserva de 10% para a carga e 30% para a produção eólica.....	62

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AD	Agente de Decisão
CHP	<i>Combined heat and power</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
PD	Programação dinâmica
P	Potência activa
Pmin	Potência mínima
Pmax	Potência máxima
R	Reserva
REN	Redes Energéticas Nacionais
SAD	Sistema de Apoio à Decisão
SEE	Sistema de Energia Eléctrica
UC	<i>Unit Commitment</i>

Lista de símbolos

%	Porcentagem
α	Valorização do corte de carga
β	Valorização do desperdício de eólica
\$	Custo
\$/h	Custo por hora
W	Watt
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora

Capítulo 1

Introdução

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Universidade do Porto.

Neste trabalho de dissertação é desenvolvida uma metodologia de escalonamento e pré-despacho através de programação dinâmica, com inclusão da incerteza da produção eólica. A incerteza de produção eólica é traduzida pela utilização de vários cenários de produção eólica, todos eles com igual probabilidade de acontecerem. Após feito o despacho são analisados indicadores de ajuda à decisão para a escolha da melhor alternativa de produção eólica que é considerada para o escalonamento, e quais as consequências de ocorrer um cenário de produção que não o cenário para qual foi feito o escalonamento e pré-despacho.

Este capítulo apresenta uma visão da temática abordada e define quais os objectivos e motivações inerentes à sua realização. Na parte final deste mesmo capítulo apresenta-se uma breve descrição sobre a estrutura desta dissertação.

1.1 - Enquadramento

A energia eléctrica desde há muito tempo que vem assumindo um papel fundamental na economia mundial. Desde o aparecimento deste tipo de energia, que muitos paradigmas se foram alterando, promovendo alterações significativas no bem-estar das pessoas, indústrias, etc.

Actualmente a elevada dependência energética leva ao constante racionamento e à necessidade de elevados índices de qualidade da energia eléctrica. A continuidade de serviço e a qualidade da onda de tensão são alguns parâmetros passíveis de serem caracterizados através de indicadores que apontam o caminho a seguir, isto é, indicam a necessidade de novos investimentos para melhorar a qualidade da energia eléctrica.

Um sistema de energia é composto pela produção de energia eléctrica, transporte e consumo de energia. É fundamental que o processo clássico, que decorre desde a produção

até ao consumo seja planeado para que todos os limites técnicos sejam cumpridos e seja também garantida a qualidade de serviço.

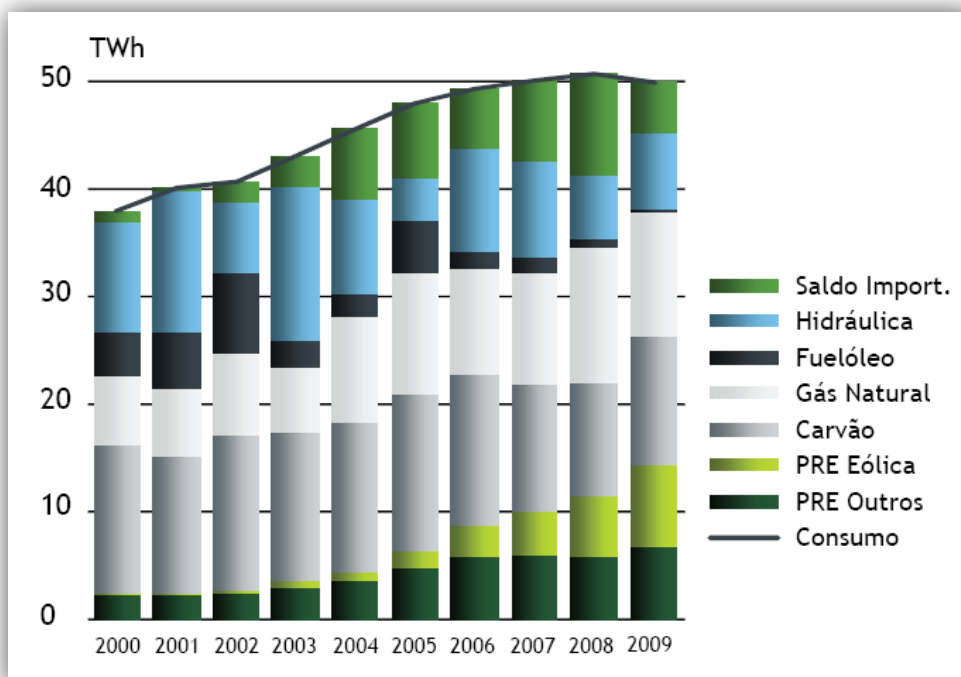


Figura 1.1 - Evolução anual das formas de produção de energia em Portugal [1].

A elevada integração de unidades de geração que se baseiam na utilização de recursos renováveis em detrimento das centrais térmicas convencionais, fomenta a necessidade de os sistemas de distribuição e transmissão desenvolverem novos conceitos relacionados com a monitorização, controlo e gestão das unidades de produção, considerando para isso as restrições de rede e o funcionamento do mercado de electricidade. Contudo, recursos como a produção eólica são caracterizados por ostentarem vulnerabilidade, isto é, intermitência causada pela volatilidade e variabilidade da fonte primária. Assim sendo, para o sistema eléctrico nacional, especificadamente para os centros de despacho, é necessária a existência de dados sobre o comportamento da evolução de produção e dos consumos. Desta forma é possível:

- Planeamento de operação (escalonamento e pré-despacho), que futuramente será definido pelos mercados;
- Garantir a segurança de abastecimento;
- Operar nos mercados de electricidade;
- Escolha dos níveis de reserva;
- Prever trânsitos nas interligações;
- Planear a manutenção dos centros produtores;
- Auxiliar a resolver problemas de gestão de congestionamentos.

1.2- Motivação

O controlo e operação do sistema eléctrico, bem como a integração das fontes de energia renovável, nomeadamente a energia eólica, tem criado alguns problemas aos operadores de rede. As razões de alguns destes problemas são resultantes de programas governamentais ambiciosos que têm como principais finalidades:

- Redução de agentes poluentes (emissões de CO₂, NO_x)
- Aumento da eficiência energética – CHP
- Diversificação da produção energética – utilização de energias renováveis

A este nível, a UE definiu os seguintes objectivos:

- Redução dos gases de efeito de estufa em 20% até 2020
- Aumentar a eficiência energética em 20% até 2020
- Utilização de energias renováveis, com peso na produção energética de 20% até 2020.

Apesar da necessidade de níveis de qualidade elevados, surge do outro lado da balança o factor económico. Não é possível garantir níveis de qualidade elevadíssimos se isso implicar custos exorbitantes. Assim é preciso assegurar um planeamento e operação eficiente e económico do sistema eléctrico.

No que toca ao planeamento, a escolha dos geradores a funcionar tem em conta, para além das restrições de funcionamento e segurança, os factores económicos. Estes devem ser levados em conta na altura da escolha dos geradores a funcionar.

Uma vez que grande parte das actividades humanas segue uma rotina diária ou semanal, os consumos de energia eléctrica seguem esses mesmos ciclos. Os consumos são maiores durante o dia, e menores durante a noite. Como o diagrama de cargas varia ao longo do dia, procede-se a uma divisão do dia em vários períodos (tipicamente de uma hora).

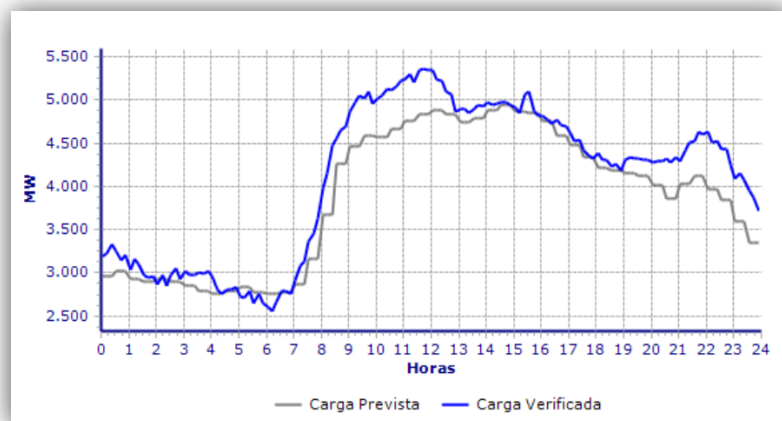


Figura 1.2 - Diagrama de cargas (16 de Junho 2010) [1].

No entanto devido aos custos associados, é insustentável ter unidades geradoras ligadas em número suficiente de modo que a potência disponível seja sempre superior à carga máxima do sistema, desta forma torna-se necessário fazer o escalonamento das unidades em cada período.

Para o escalonamento das unidades geradoras convencionais, muito contribui a produção eólica, que apresenta alguma intermitência na sua produção, como se pode ver na Figura 1.1, onde é possível comparar a potência eólica prevista e a que realmente foi gerada.

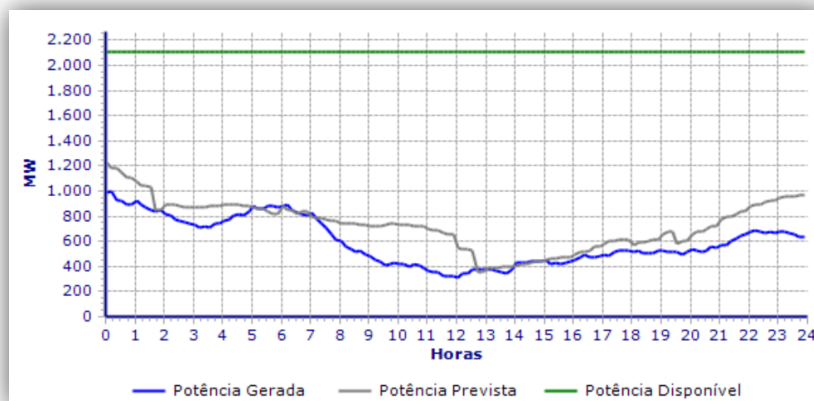


Figura 1.3 - Diagrama de produção eólica (16 de Junho 2010) [1].

Devido às intermitências, principalmente da produção eólica, mas também da carga, torna-se, extremamente importante que exista capacidade por parte do sistema electroprodutor para responder às necessidades de consumo da rede.

Esta capacidade é representada pelo conceito de reserva, que retrata a capacidade que os sistemas electroprodutores têm de satisfazer as necessidades de consumo, fornecendo potência activa assim que seja necessário.

Em geral, com estes estudos, procuram-se definir metodologias, de modo a garantir que a carga do sistema seja integralmente alimentada, reflectindo ainda as necessidades de reserva resultantes não só do crescimento do consumo e de alterações ao sistema produtor, mas também, da progressiva integração de grandes quantidades de potência eólica e outros recursos voláteis.

1.3 - Objectivos

O objectivo essencial que é proposto neste trabalho de dissertação consiste no desenvolvimento de uma metodologia, para o escalonamento e pré-despacho incluindo a incerteza da produção eólica. Esta metodologia termina com a criação de uma aplicação computacional com o mesmo obtivo.

O desenvolvimento da metodologia pode ser dividido pelos seguintes passos:

1. Modelização da incerteza de produção eólica através da consideração de um conjunto de cenários.
2. Para cada cenário de produção eólica, é usada a programação dinâmica para encontrar o escalonamento e pré-despacho óptimo, obtendo-se assim um conjunto de alternativas de escalonamento para os cenários considerados.
3. Análise do impacto de cada alternativa nos outros cenários. O impacto é analisado através do corte de carga, desperdício de produção eólica e custo de redespacho.
4. Selecção da alternativa mais robusta, tendo em conta todos os diferentes cenários.

1.4- Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo, é feita uma introdução e contextualização sobre o tema em estudo, onde se apresentam os objectivos principais que esta dissertação se propõe atingir, bem como, a motivação para o desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 2 apresentam-se os conceitos associados ao escalonamento e pré-despacho de grupos térmicos com inclusão da incerteza da produção eólica. Inicialmente é descrito em que consiste o trabalho, quais os problemas existentes e como são resolvidos. É feito um resumo das principais metodologias utilizadas para efectuar o escalonamento e pré-despacho, com particular atenção para a programação dinâmica, já que se trata da técnica utilizada nesta dissertação. Por fim, é apresentado o impacto causado pela incerteza de produção eólica no escalonamento e pré-despacho.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia desenvolvida no âmbito deste trabalho de dissertação. São apresentadas todas as etapas, sendo feita uma descrição detalhada de cada uma. É ainda feita uma descrição das ferramentas matemáticas desenvolvidas bem como identificação de todos os aspectos importantes para a integração na programação.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos através das ferramentas desenvolvidas e descritas no capítulo 3. São apresentados vários exemplos, sendo também feita uma identificação dos principais factores que influenciam a eficácia das ferramentas desenvolvidas.

Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas todas as conclusões obtidas neste trabalho de dissertação, sendo também feita uma referência a trabalhos futuros.

1.5 - Ferramentas utilizadas no desenvolvimento do trabalho

No desenvolvimento desta dissertação, foi usada como ferramenta principal de trabalho o MATLAB, ambiente utilizado para toda a programação. Após a execução do programa são exportados os dados finais para o Excel do Microsoft Office, onde é feita toda a análise e tratamento de dados.

Capítulo 2

Influência da incerteza de produção eólica no escalonamento e pré-despacho

2.1 - Introdução

Sendo o escalonamento e pré-despacho um problema difícil e desafiador, devido à sua importância económica que normalmente comporta grandes custos operacionais, este é motivo de preocupação para companhias geradoras de energia. A investigação centrou-se, nas últimas décadas, essencialmente no desenvolvimento de ferramentas mais rápidas e eficazes de optimização de produção de energia. Estas preocupações, levaram naturalmente à concepção de diversas variantes da formulação clássica para centrais térmicas, assim vários modelos considerando os custos de combustível e/ou limitações técnicas, foram estudados [3].

A crescente importância das questões ambientais, bem como a intenção expressa por vários países para reduzir as emissões poluentes, também deu origem a modelos que incluem restrições de emissões, ou objectivos que visam a minimiza-las.

Existem outras variantes para o problema de lidar com diferentes fontes de energia como a coordenação hidro-térmica, particularmente no que respeita à bombagem. Em tais casos, deve-se considerar um mecanismo de coordenação entre todas as fontes para obter uma optimização global do sistema. No entanto esta problemática não faz parte deste trabalho para o escalonamento e pré-despacho.

Este capítulo apresenta uma descrição do problema e uma abordagem aos temas que estão relacionados com modelização da incerteza de produção eólica no escalonamento e pré-despacho.

2.2 - O problema

Com este trabalho pretende-se estudar os efeitos da incerteza de produção eólica no escalonamento e no pré-despacho de grupos de produção térmica. Assim o objectivo é contribuir para que se defina um escalonamento e pré-despacho que seja robusto, isto é, que seja capaz de atingir uma boa performance na generalidade dos cenários que podem vir a ocorrer.

Quando se considera a incerteza de produção eólica, existem particularidades e problemas que interessam estudar. Quando se faz um escalonamento considerando certos valores de potência eólica, há um custo associado, mas caso ocorram outros valores de potência eólica, o custo será diferente e agora o escalonamento que era óptimo, deixou de o ser e isso pode tornar-se dispendioso. Em casos mais graves de variação de potência eólica, podem surgir consequências como o corte de carga ou desperdício de produção eólica.

Assim, este trabalho propõe-se desenvolver uma metodologia que permita analisar essas particularidades de modo a que se faça um melhor escalonamento dos diferentes grupos de produção térmica.

A metodologia é baseada na consideração de alternativas e na determinação da melhor solução para cada alternativa, sendo essas diversas soluções candidatas, posteriormente comparadas na sua performance em relação à robustez e problemas que possam causar.

A comparação das alternativas de escalonamento passa pela análise do corte de carga, desperdício de eólica e custo de redespacho. O corte de carga pode acontecer depois de feito o escalonamento, caso a potência eólica seja menor do que a que se pensava e as unidades térmicas escaladas atinjam o seu limite máximo de produção. Por outro lado, o desperdício de eólica pode acontecer, caso a potência eólica seja superior ao que era esperado e as unidades térmicas escaladas atinjam o seu limite mínimo.

Por fim, é importante referir que entre a geração e a carga, considera-se que estamos perante uma ligação de nó único (Figura 2.1), ou seja, não são consideradas as perdas.

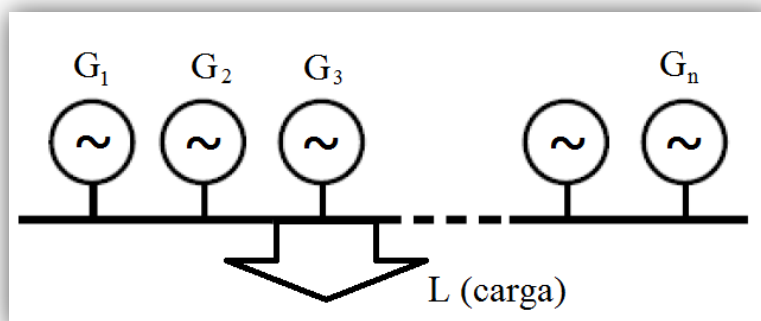


Figura 2.1 - Diagrama de barramento único.

2.3 - Escalonamento (*unit commitment*) e pré-despacho

A operação do Sistema de Energia Eléctrica deve ser conduzida de forma a otimizar o custo de produção e garantir a segurança do fornecimento. Assim, o escalonamento e o pré-despacho são um problema de optimização, onde se pretende um regime de funcionamento que conduza ao mínimo custo, satisfazendo a carga e respeitando todos os limites técnicos.

Em cada período de funcionamento existe uma carga prevista que é necessário alimentar, assim o problema do escalonamento¹ consiste em escolher as máquinas que deverão ser usadas para alimentar a carga prevista da forma mais económica.

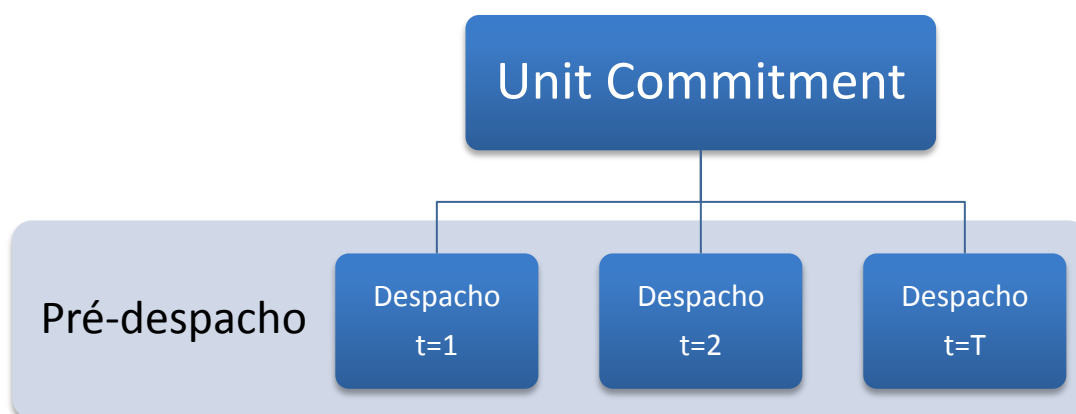


Figura 2.2 - Esquemática do problema do *Unit Commitment* e pré-despacho [3].

Nos problemas de escalonamento e pré-despacho existe um conjunto de decisões a tomar que levam à distribuição da carga pelos geradores do sistema de energia eléctrica. O problema da escolha dos geradores a funcionar consiste num problema económico, onde toda a carga deve ser alimentada considerando tempos de arranque e paragem dos grupos produtores, limites de produção, etc.

Isto leva a um método de resolução de duas fases (Figura 2.2). Em primeiro lugar, para cada período de tempo, deve ser decidido quais as unidades de geração que estão ligadas ou desligadas. Em segundo lugar, o problema é dissociado em T subproblemas, sendo T o número de períodos, e para cada subproblema, é calculado a produção de cada unidade geradora [3].

O pré-despacho consiste numa antecipação para um horizonte temporal de 3 a 7 dias da carga a atribuir a cada grupo, com o fim de tomar em consideração os custos de funcionamento, associados ao consumo de combustível.

Para resolver o problema é necessário encontrar todas as soluções possíveis, isto é, os estados de funcionamento possíveis das máquinas em cada período. Para isso realizaram-se todas as combinações possíveis com o número de máquinas existentes. No entanto algumas

¹ Neste documento é por vezes utilizada a palavra inglesa *unit commitment*.

dessas combinações revelam-se impossíveis devido ao cumprimento dos limites técnicos dos geradores.

No cálculo do pré-despacho deve ter em consideração uma percentagem de reserva girante, isto é, potência disponível para fazer face a súbitos aumentos de potência ou a saídas forçadas de serviço de uma ou mais máquinas. Assim, a reserva girante corresponde à potência total das máquinas em funcionamento menos a carga total prevista em cada período.

O problema da optimização do *unit commitment* reside no espaço de soluções existentes, isto é, no número de estados onde a solução óptima pode residir.

2.3.1 - Métodos de resolução

Unit Commitment é um problema que determina o escalonamento de unidades de produção dentro de um sistema de potência, sujeito a restrições operacionais. Consiste no processo de decisão que selecciona as unidades que são ligadas ou desligadas, tendo em conta o tipo de combustível, a geração de energia de cada unidade e as margens de reserva necessárias.

Existem vários algoritmos, ou técnicas de optimização para a resolução do problema do *unit commitment* [2],[4],[12] e [13], entre eles os seguintes:

- **Ordem de mérito:** consiste num problema baseado em heurísticas por ordenação de custos, onde as decisões para o *unit commitment* são tomadas de acordo com uma lista de prioridades previamente calculadas. As restrições operacionais são incluídas heurísticamente, sendo considerado um método não muito rigoroso [13]. Esta abordagem heurística, tem vindo a ser estudada nas últimas décadas [14]-[16].
- **Programação dinâmica:** Esta metodologia tem a principal vantagem de permitir reduzir o espaço de pesquisa, ao evitar repetições de cálculos que ocorrem na enumeração total de soluções. Permite também com relativa facilidade adicionar restrições que afectam as operações em cada período de tempo [13]. Esta metodologia é abordada com maior detalhe acerca do seu funcionamento na secção 2.4, pois é a metodologia utilizada neste trabalho, o que requiere uma atenção especial.
- **Relaxação lagrangiana:** A base desta metodologia segue o princípio da “relaxação”, que consiste em ignorar temporariamente as restrições, o que permite decompor o problema em vários subproblemas para cada grupo de produção. Os problemas estão ligados pelos multiplicadores de lagrange que são adicionados ao problema principal para gera um problema dual [12]. O processo de resolução usa a optimização dual para ir impondo (iteractivamente) restrições aos subproblemas dos grupos, com base no grau de satisfação das restrições relaxadas, até ser encontrada uma solução final que satisfaça as restrições, e que é óptima.

Mais recentemente têm surgido abordagens meta-heurísticas baseadas em algoritmos genéticos [17], ou procedimento baseado em GRASP - *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* [18], que permite uma manipulação mais fácil das restrições do problema. As meta-heurísticas são particularmente interessantes pois são capazes de incorporar novas informações ou detalhes no modelo, sendo mais simples de adaptar a variantes do problema e podem resolver problemas em que a função objectivo seja diferente, sem ser necessário fazer alterações no código do programa [18].

2.3.2 - Custos de produção dos grupos térmicos

Os custos associados aos grupos térmicos dependem do tipo de máquina primária (turbina a vapor, turbina a gás, grupo diesel) e de outros aspectos, como o processo de geração do vapor (*fuel-oil*, carvão, nuclear) ou a idade da máquina, o que implica uma análise caso a caso em problemas reais. Os custos associados são essencialmente os que se apresentam a seguir:

- **Custo de funcionamento:** custo associado ao consumo de combustível para produção de energia, sendo uma função tipicamente não linear. A função custo inclui o ponto (0,0), correspondente ao estado de paragem, o que a torna descontínua, como é patente na Figura 2.2. Este custo é o mesmo que se utiliza no despacho (embora nesse caso não se considere a hipótese do grupo estar parado). A função custo é muitas vezes aproximada polinomialmente (2º ou 3º grau).

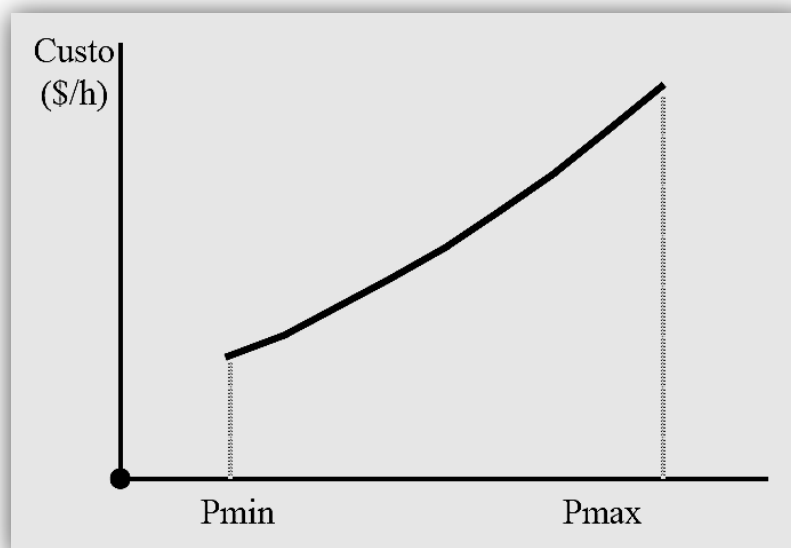


Figura 2.3 - Função custo de funcionamento [2].

- **Custo de arranque:** é um custo independentemente da potência que os grupos produzem, existe um custo de arranque associado, que depende no caso das centrais com turbina a vapor, do tempo de paragem anterior e do facto de se manterem ou não as caldeiras quentes durante o período de paragem. No primeiro caso, ou seja, arranque a quente (*banking*), o custo de arranque tem uma expressão do tipo

$$C(t) = C_A + c_t \cdot t \quad (2.1)$$

onde C_A (\$) é o custo fixo de arranque, independente do tempo decorrido, e c_t (\$/h) é o custo horário associado ao consumo de combustível para manter a temperatura necessária. Na segunda hipótese, ou seja arranque a frio (*cooling*), o custo depende do tempo decorrido desde a paragem do grupo (e corte do combustível), com a segunda parcela a tender exponencialmente para o custo C_F de arranque a frio

$$C(t) = C_A + C_F \cdot (1 - e^{-t/\alpha}) \quad (2.2)$$

Repare-se que a escolha entre os dois tipos de paragem é, em si, um problema interessante. Como se vê na Figura 2.3, a primeira hipótese é melhor para paragens curtas (algumas horas), deixando de o ser a partir de um ponto de equilíbrio que depende, dos parâmetros das expressões anteriores.

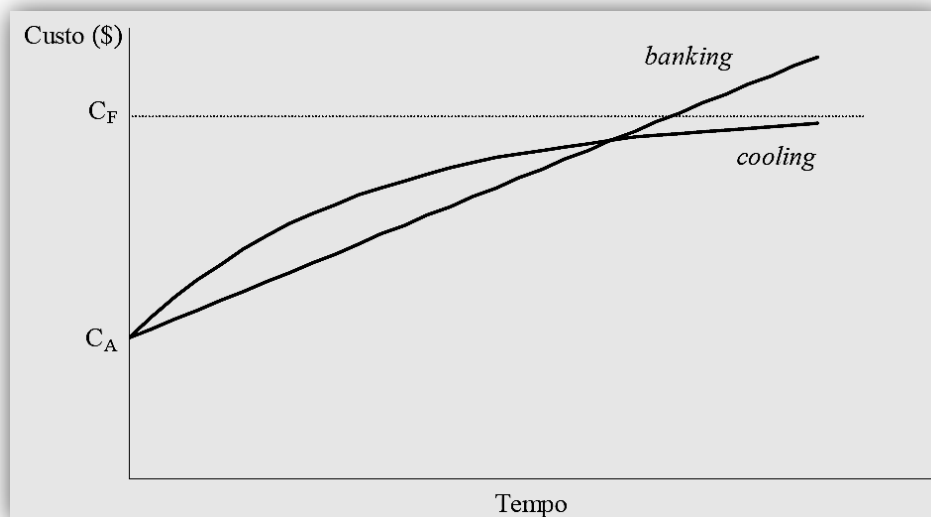


Figura 2.4 - Custo de arranque de centrais com turbina a vapor [2].

No caso dos grupos *diesel*, o arranque pode assumir formas complexas, podendo incluir patamares de aquecimento intermédio, mudanças de combustível, etc, pelo

que o custo de arranque pode não ser simples de descrever analiticamente. Daí que se usem, muitas vezes, modelos simplificados.

- **Custo de paragem:** quando se modeliza o custo de arranque de forma simplificada (em vez de usar as formulações indicadas atrás), os custos associados a manter condições para um arranque a quente (*banking*) são modelizados como custos de paragem. Também podem ter que ser considerados custos de paragem em certos tipos de grupo *diesel* [2].

2.3.3 - Restrições de potência gerada

A restrição fundamental a considerar é, como habitualmente nos sistemas eléctricos de energia, a satisfação da carga, ou seja, a potência total disponível (soma das potências máximas de todos os grupos escalados) tem que ser superior à carga total prevista, em todos os intervalos. Como se disse, a diferença tem que ser superior à reserva girante definida para cada intervalo, de acordo com um dos princípios seguintes:

- Valor igual a uma percentagem da carga prevista para o intervalo;
- Valor igual à potência máxima da maior unidade em funcionamento;
- Reserva que garanta um risco de perda de carga inferior a um certo valor, tendo em conta as probabilidades de avaria dos grupos.

Os grupos térmicos, sobretudo aqueles em que a máquina primária é a turbina a vapor, não podem ser ligados de forma a produzirem imediatamente a potência que se pretende, nem podem deslastrar imediatamente a carga que lhes está atribuída. Há também motivos técnicos que excluem o funcionamento ou paragem durante períodos curtos. De forma abreviada, as restrições associadas são as que se apresentam a seguir:

- **Tempo de arranque:** para cada tipo de grupo, define-se um tempo mínimo de arranque que depende do tempo de paragem anterior e está relacionado com a necessidade de aquecer caldeiras, obter pressões de vapor e outros condicionalismos técnicos. Em consequência, a decisão de utilizar o grupo pode ter de ser tomada muito antes da hora a que a potência respectiva vai ser necessária.
- **Tempos mínimos de paragem e de funcionamento:** por razões fundamentalmente de ordem técnica, os períodos de paragem e funcionamento não devem ser demasiado reduzidos. Valores mínimos típicos para grupos com turbinas a vapor são 2 a 12 horas para o tempo de paragem e 1 a 8 horas para o tempo de funcionamento. Os restantes tipos de máquinas apresentam tempos mínimos menores.

- **Limites de produção:** valor máximo e mínimo da potência produzida pelo grupo, fixados por razões técnicas e económicas. Por exemplo, nos grupos Diesel, a produção a potências baixas é economicamente inviável, embora fosse possível tecnicamente (usando óleo diesel em vez de *fuel-oil*). Valores típicos da potência mínima para grupos com turbina a vapor são 40 a 70% da potência máxima. Estes limites também se utilizam no despacho.
- **Taxas máximas de tomada e deslastre de carga:** não sendo possíveis variações muito rápidas da potência produzida pelos grupos, definem-se taxas máximas de tomada e deslastre de carga (MW/h) que condicionam as alterações de produção em intervalos de tempo sucessivos. No despacho horário associado ao escalonamento, designado normalmente por pré-despacho, estes limites têm sobretudo influência nos períodos iniciais e finais de funcionamento. Estas restrições também são utilizadas no despacho multi-período, normalmente sob a forma de janelas de operação (máxima variação entre períodos seguintes) [2].

Os aspectos focados, nomeadamente a questão dos tempos de arranque, mostram que o pré-despacho tem uma escala temporal completamente diferente da do despacho, possuindo, além disso, muito maior incerteza na definição das cargas e maior complexidade na formulação matemática.

É de referir que neste trabalho não são considerados os tempos de arranque, os tempos mínimos de paragem e de funcionamento nem as taxas máximas de tomada e deslastre de carga.

2.4 - Programação dinâmica para o problema do escalonamento

O método utilizado para a resolução do problema de *unit commitment* foi a programação dinâmica, assim, apenas esta metodologia será abordada com maior detalhe neste trabalho.

A aplicação de métodos digitais para resolver uma grande variedade de problemas de optimização dinâmica levou nos anos 50 o Dr. *Richard Bellman* e seus associados ao desenvolvimento da programação dinâmica. Esta técnica é útil para na resolução de uma variedade de problemas e pode reduzir muito a esforço computacional para encontrar as melhores trajectórias [4].

A programação dinâmica decompõe um problema numa série de problemas mais pequenos, onde resolve primeiro os problemas de pequena dimensão de modo a obter uma solução óptima para o problema original, passo a passo. A melhor solução é desenvolvida recursivamente a partir do subproblema.

A programação dinâmica, caracteriza-se por uma metodologia de optimização em problemas que requerem decisões sequenciais e interligadas, ou seja, qualquer que seja o

estado e as decisões iniciais, as decisões seguintes tem de constituir uma estratégia óptima resultante da primeira decisão.

A título de exemplo, na Figura 2.5, considera-se um problema com 6 períodos, onde as circunferências representam os estados possíveis. O problema consiste em encontrar a trajectória óptima entre o estado A e o estado N, ou seja, aquela que apresenta o custo global mínimo.

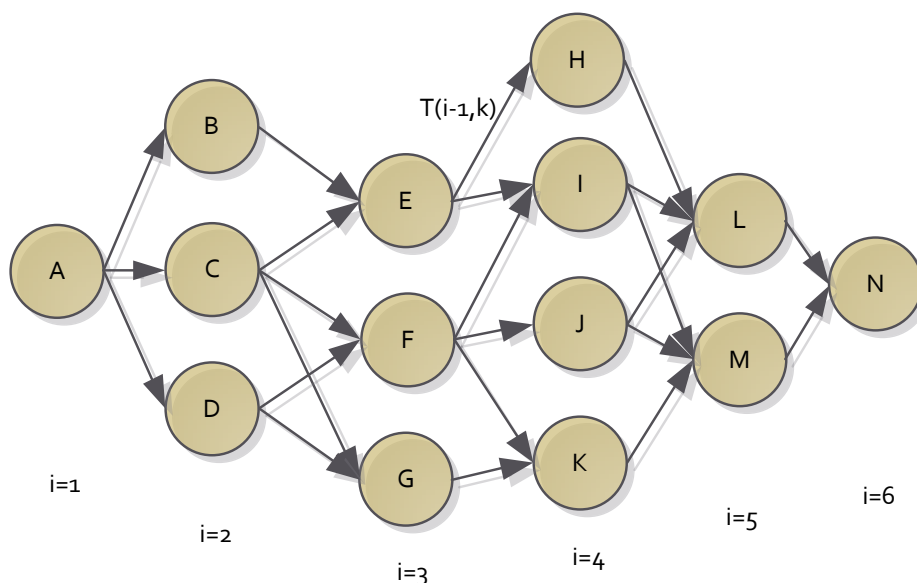


Figura 2.5 - Exemplo gráfico de programação dinâmica [4].

A programação dinâmica tem algumas vantagens, sendo a principal a redução do espaço de pesquisa. Desta forma evitam-se cálculos desnecessários provenientes da enumeração total de soluções reduzindo assim o espaço de pesquisa e facilitando a análise das soluções.

No entanto, a programação dinâmica pode não ser o melhor para sistemas com grande dimensão devido à conhecida “*maldição da dimensionalidade*”, sendo o número total de combinações existentes para cada período dadas por

$$C(n) = 2^n - 1 \quad (2.3)$$

Considerando o número de períodos existentes, as combinações existentes são dadas por

$$C(n, i) = (2^n - 1)^i \quad (2.4)$$

onde n representa o número de máquinas e i representa o número de períodos. De forma a reduzir certos problemas causados pela dimensionalidade, algumas das técnicas propostas

usam formas de simplificação e de aproximação com o algoritmo fundamental da programação dinâmica [19].

Na abordagem, primeiro usada por Lowery [20], e depois redefinido por Ayoub e Patton [21], a unidade de produção que era desligada era variável, assim como a sua energia produzida em cada período. Ayoub e Patton, incluíram ainda no seu método, técnicas probabilísticas para determinação da reserva.

Outras abordagens se seguiram, com utilização de uma lista de prioridades [22] e [23], utilização de técnicas de selecção dos estados mais promissores com implementação de subrotinas para o cálculo aproximado do despacho económico [24] e utilização de redes neuronais [25].

Existem duas abordagens possíveis para a pesquisa na programação dinâmica, uma abordagem “*backward*” (pesquisa para trás) e “*forward*” (pesquisa para a frente).

Na abordagem “*backward*” a solução começa no último intervalo e continua até aos intervalos iniciais. No entanto esta abordagem não cobre algumas situações práticas, tais como o custo de ligação de uma unidade, se este custo depender do tempo que esteve desligada.

A abordagem utilizada neste trabalho foi a “*forward*” (pesquisa para a frente). Assim, este tipo de abordagem da programação dinâmica, baseia-se na resolução da seguinte fórmula de recorrência

$$F(i, j) = \min_k [C(i, j) + T((i - 1, k) - (i, j)) + F(i - 1, k)] \quad (2.5)$$

onde i é o período, j o estado actual e k indica os diversos estados do período anterior. $F(i, j)$ é o custo total desde o início associado ao estado j , $C(i, j)$ é o custo total da combinação j no período i , e T representa os custos de transição entre o estado k e i . Na fórmula de recorrência está implícito o princípio da optimalidade, sendo este princípio a base da programação dinâmica.

2.5 - Previsão de produção eólica

Segundo Makridakis [26] é frequente existir um desfasamento temporal entre a consciência de um evento iminente e a necessidade ou ocorrência desse evento. Assim, esse período de tempo revela-se como a principal razão para o planear e prever. A necessidade de prever alia-se ao facto de tentar diminuir a sua dependência face ao acaso, assim em diversas situações, a previsão é imprescindível para determinar quando um evento ou uma necessidade irá ocorrer, para que possa ser possível desencadear acções pertinentes e apropriadas.

Ao longo do tempo, as ferramentas de previsão têm sido utilizadas no auxílio da gestão dos sistemas eléctricos, salientando-se a previsão de carga e mais recentemente a previsão eólica. Portanto, a previsão revela-se, fundamentalmente, uma ajuda importante para um planeamento eficaz e eficiente.

De forma a assegurar maiores níveis de precisão e fiabilidade, os sistemas de previsão têm progredido e podem ser caracterizados pelo horizonte temporal das suas previsões, sendo tipicamente subdividido em três secções:

- **Previsão de Muito Curto Prazo:** Sistema de previsão para horizontes temporais de muito curto prazo, desde alguns segundos até 6 horas. Demonstram interesse na definição da garantia de segurança de abastecimento por parte do operador da rede eléctrica.
- **Previsão de Curto Prazo:** Previsão para um horizonte temporal compreendido entre os 30 minutos e as 72 horas.
- **Previsão de Longo Prazo:** O horizonte temporal dos sistemas de previsão vai desde as 72 horas até 7 dias. Permite definir o escalonamento e pré-despacho, bem como planear e programar acções de manutenção.

Assim, podemos concluir que quanto maior for o horizonte temporal da previsão, maior será o erro associado à precisão dos resultados, como se pode ver pela Figura 2.6.

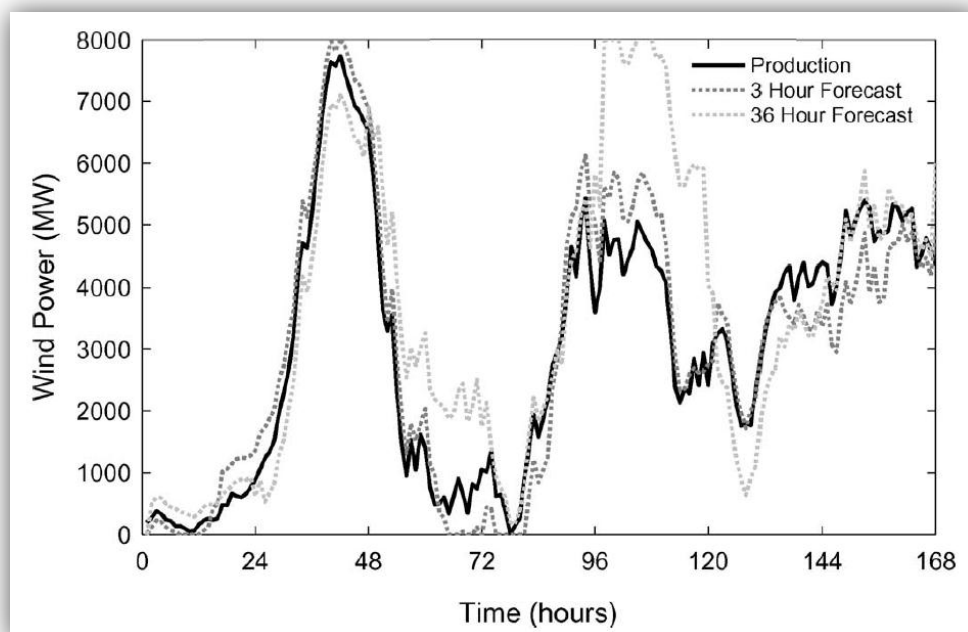


Figura 2.6 - Exemplo gráfico com diferentes horizontes temporais de previsão de produção eólica [27].

É notório referir que, dependendo do horizonte temporal da previsão, os sistemas de previsão dão um auxílio importante no pré-despacho do sistema electroprodutor ou apoiam as decisões de operação da rede eléctrica.

Por vezes, são apresentadas várias alternativas de produção eólica, estas alternativas são designadas por cenários de produção eólica. Os cenários são baseados em processos estocásticos que utilizam a probabilidade bi-dimensional discreta, associada a cada intervalo de tempo para o dia definido, como se pode ver na Figura 2.7.

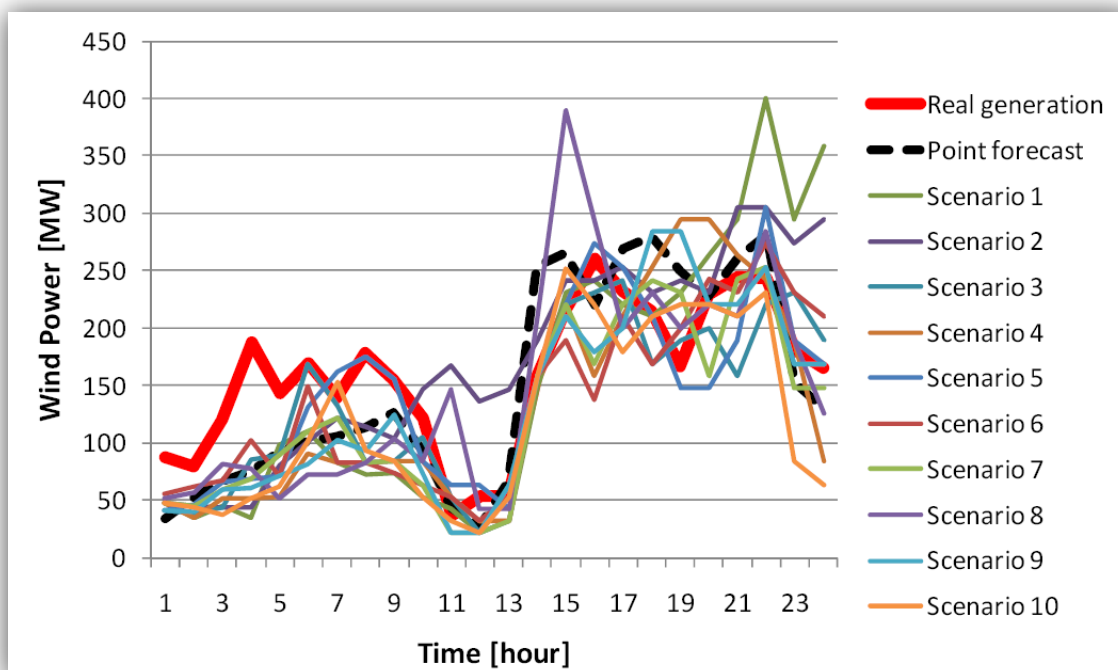


Figura 2.7 - Exemplo gráfico com diferentes cenários de produção eólica [28].

2.6 - Impacto da incerteza de produção eólica no escalonamento e pré-despacho

Em vários países Europeus e do mundo, a energia eólica está a tornar-se rapidamente uma fonte de energia com um impacto e quantidade de produção muito significativa. A elevada penetração no SEE da energia eólica, apresenta alguns problemas para a operação do sistema de potência.

Ao contrário da produção convencional que é facilmente controlável, a produção eólica é intermitente pois depende da sua fonte primária que pode ser prevista mas ainda assim pode ter variações. A performance do sistema pode ser prejudicada no caso de uma diminuição imprevista da energia eólica pois a capacidade de resposta por parte das unidades que se

encontram ligadas, pode não ser suficiente para satisfazer esta mudança. Também uma subida imprevista de produção eólica, pode ser desfavorável no caso de o sistema não ter capacidade de canalizar o excesso de energia eólica para outros recursos que não os disponíveis. Neste caso haveria um desperdício de produção eólica. O mesmo raciocínio se aplica à produção eólica excedente que pode acontecer durante a noite, quando o vento é geralmente mais forte, mas a carga do sistema é baixa. A razão do desperdício de eólica, deve-se à necessidade de manter em funcionamento unidades de arranque lento, como centrais a carvão, *fuel* e nuclear, proveniente das limitações técnicas e económicas destas unidades [28]. O desperdício de eólica pode também estar associado à impossibilidade de coordenação com outras formas de energia, por exemplo coordenação com hídricas de bombagem, ou impossibilidade de envio para sistemas vizinhos.

A variabilidade de produção eólica é também uma questão de programação da produção. Estes problemas estão relacionados com a selecção óptima das unidades de geração a colocar em funcionamento (*Unit Commitment*), e para os níveis de produção óptima das unidades despachadas (despacho). Assim, estes procedimentos para a produção convencional precisam de ser revistos [27].

Tuohy [29], em continuação dos estudos [30] e [31], estuda os efeitos da produção eólica estocástica no *unit commitment* e no despacho em tempo real no mercado. Usa um modelo designado WILMAR [32], que é essencialmente um modelo de planeamento, baseando-se numa árvore de cenários e nos pressupostos necessários para as horas seguintes e onde identifica os benefícios de uma optimização estocástica em relação à determinística para abordar a incerteza da produção eólica.

Ummels [27], analisa o impacto da produção eólica no *unit commitment* e despacho de unidades térmicas no sistema holandês, onde mostra que a produção de energia eólica reduz o custo de operação do sistema e a emissão de gases para a atmosfera. Conclui ainda que níveis altos de reserva são fundamentais para equilibrar a variabilidade da produção eólica e da carga em cada período de tempo.

É também analisada por vários autores a segurança, que pode ser posta em causa devido à variabilidade de produção eólica [33] e [34]. A segurança está por vezes relacionada com o cumprimento dos mínimos técnicos de produção em unidades térmicas que pode surgir numa situação em que a carga é baixa e a produção eólica é alta. Em situação contrária analisam a situação rápida queda na produção eólica, que exige uma rápida subida das unidades térmicas, o que nem sempre é possível.

A maior parte dos estudos onde se considera a incerteza de produção eólica, são feitos para um dia de antecedência na operação do sistema, e para a combinação das várias formas de produção de energia, térmica, nuclear e hídrica, por exemplo em [35].

Pode dizer-se que o principal problema associado à temática apresentada, está relacionado com a regulação da reserva girante limitada de energia, tipicamente associado à volatilidade da produção eólica. Para um sistema de produção com base térmica, onde existem unidades com limites mínima de produção, podem resultar em desperdício de produção eólica em quantidades cada vez maiores com o aumento da energia eólica instalada. Assim, a reserva para a energia eólica deve ser preservada para garantir a fiabilidade operacional e minimizar os custos que possam estar relacionados com as variações de produção eólica.

Capítulo 3

Metodologia utilizada no estudo

3.1 - Introdução

Neste capítulo é feita a apresentação com detalhe da metodologia desenvolvida, que tem como objectivo o escalonamento das máquinas térmicas considerando o risco associado à volatilidade da produção eólica, bem como a escolha da melhor alternativa de escalonamento e as consequências de ocorrer outro cenário de produção eólica que não o cenário considerado para o escalonamento.

É de referir que esta metodologia não garante a obtenção da alternativa mais robusta, pois ela poderia não corresponder ao óptimo de nenhum dos cenários.

Etapas como a previsão de produção eólica e previsão das cargas, não fazem parte do estudo para este trabalho, assim, são utilizados valores que foram criados como exemplo para os cenários de produção e carga nos diferentes períodos.

Assim sendo, o objectivo essencial deste trabalho de dissertação é apresentar uma metodologia e a implementação da mesma.

3.2 - Descrição da metodologia

A metodologia aqui apresentada tem como fim a escolha da melhor alternativa de escalonamento e análise das consequências de ocorrer outro cenário de produção eólica que não o cenário para o qual foi feito o escalonamento.

O escalonamento e pré-despacho é essencialmente um problema de optimização, onde se procura satisfazer as cargas previstas, incluindo a produção de eólica, tendo em conta as reservas associadas e respeitando todas as restrições técnicas, com objectivo de obter um custo mínimo para o pré-despacho. O cálculo do custo óptimo bem como o pré-despacho é obtido com recurso à ferramenta *MatPower*, uma programa que é incorporado no MATLAB

(será explicado na secção 3.4.3 o seu funcionamento), sendo o escalonamento obtido através de programação dinâmica.

Finalmente é feita a análise para das diferentes alternativas e a escolha da melhor alternativa de escalonamento e pré-despacho.

3.3 - Etapas do projecto

Na Figura 3.1 é apresentado um diagrama com a esquematização das principais etapas, que se entendeu como necessário para uma melhor percepção da estrutura do projecto e de modo a atingir o objectivo proposto. Mais tarde é apresentada uma descrição em detalhe de cada etapa e são apresentadas as ferramentas que interligam essas etapas.

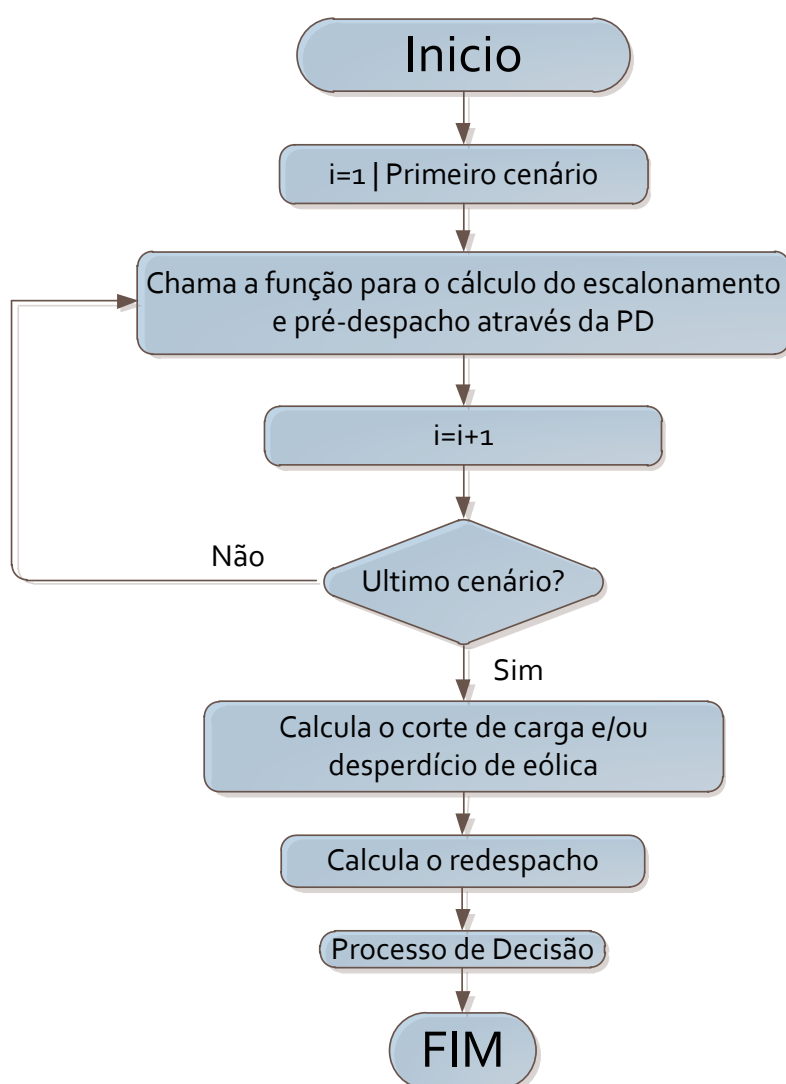


Figura 3.1 - Fluxograma das principais etapas.

3.4 - Escalonamento e pré-despacho com programação dinâmica

A utilização da programação dinâmica nos problemas de escalonamento e pré-despacho permite reduzir muito o espaço de pesquisa, na medida em que se limita ao tratamento soluções possíveis em cada intervalo, ou seja, apenas são analisadas as combinações de geradores que podem satisfazer a carga necessária em cada período.

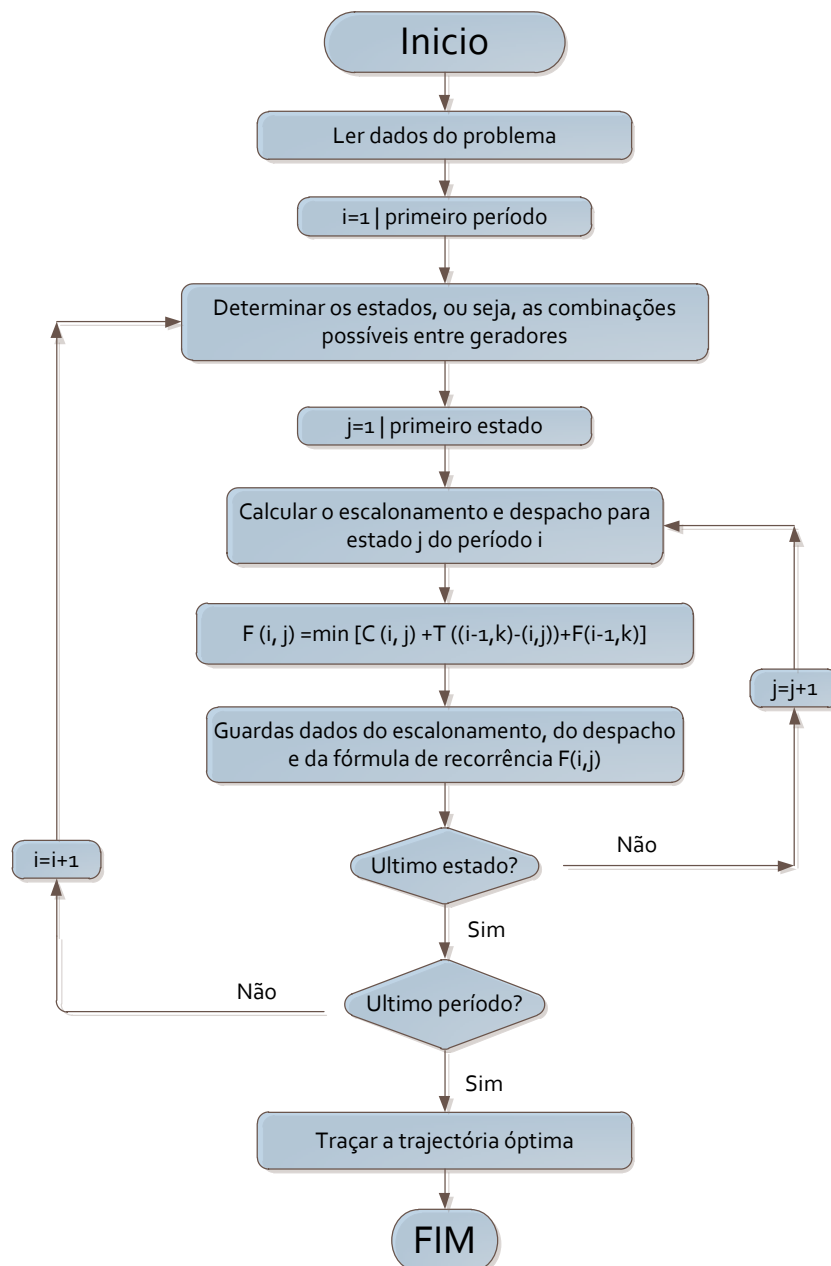


Figura 3.2 - Fluxograma para a programação dinâmica do tipo "forward"

É de referir que o cálculo do escalonamento e pré-despacho através da programação dinâmica foi desenvolvido com programação em MATLAB.

3.4.1 - Notação utilizada

Em primeiro lugar, é importante definir a notação que será usada ao longo da metodologia criada, de forma a permitir a uma melhor compreensão da mesma. Assim, temos

- i - Períodos de tempo ($i = 1, \dots, I$) - o horizonte temporal do modelo é dividido em períodos de uma hora.
- n - Unidades térmicas ($n = 1, \dots, N$)
- m - Unidades térmicas despachadas ($m = 1, \dots, M$)
- j - Estado actual
- k - Estado anterior
- P_n^{min}, P_n^{max} - Mínimo e máximo de produção da unidade n (MW).
- $P_{carga}(i), P_{eólica}(i)$ - Potência da carga e produção de eólica no período i (MW).
- $R_{carga}, R_{eólica}$ - Reserva para a carga e para a produção eólica (MW).
- $C(P_n)$ - Custo de produção da máquina n (\$/h).

3.4.2 - Estados possíveis

No actual contexto nacional [10], é obrigatório o despacho da produção eólica, caso não sejam postos em causa os limites técnicos das máquinas térmicas, a carga total a satisfazer em cada período i é dada por

$$Carga\ Total(i) = P_{carga}(i) - P_{eólica}(i) \quad (3.1)$$

Para cada período, temos de considerar a reserva girante, assim a combinação entre os diferentes grupos tem de ser capaz de satisfazer a carga mais a reserva. A alocação da reserva girante obedece a determinadas regras, no entanto esse assunto não será abordado no contexto deste trabalho, assim consideramos que a capacidade máxima em cada período, ou seja, a capacidade que é preciso satisfazer pela produção a partir de unidades térmicas, deve ser a seguinte

$$Cap_{max}(i) = P_{carga}(i) - P_{eólica}(i) + R_{carga} + R_{eólica} \quad (3.2)$$

Em cada um dos períodos, existem $2^n - 1$ combinações possíveis, sendo designado por estado cada uma das combinações das n máquinas, podendo algumas das máquinas encontrarse desligadas. Neste conjunto de combinações, nem todas são admissíveis, isto é, pode acontecer que a potência total disponível não seja suficiente². Para fazer esta selecção das combinações admissíveis, é preciso satisfazer as seguintes condições

$$P_{min}(j) \leq P_{carga}(i) \quad \wedge \quad P_{max}(j) \leq P_{carga}(i) + Cap_{max}(i) \quad (3.3)$$

Para guardar a informação das combinações possíveis para cada estado j , foi utilizada uma tabela com a estrutura da que se apresenta a seguir

Tabela 3.1 – Matriz modelo para selecção das combinações possíveis - Matriz A.

<i>Combinação activa</i>	P_{min}	P_{max}	G_1	G_2	G_3	...	G_n
1	200	600	1	0	0	...	0
0	180	500	0	1	0	...	0
0	110	400	0	0	1	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...

De acordo com a Tabela 3.1, os estados possíveis são apenas aqueles cuja combinação de geradores tenha a combinação activa com o valor 1 e assim, apenas será efectuado o despacho para estas combinações de geradores.

3.4.3 - Escalonamento e pré-despacho óptimo

Tendo os estados possíveis para cada período, procede-se ao cálculo do pré-despacho de cada estado de funcionamento, de modo a minimizar os custos de funcionamento de cada estado possível, garantindo que em cada período, toda a carga é abastecida e que os limites das máquinas térmicas, tanto inferior como superior, não são violados.

Em cada intervalo de tempo os níveis de produção têm como restrições o abastecimento da carga e os limites de produção em cada unidade térmica.

Matematicamente temos

$$\min \sum_{n=1}^N C(P_n) \quad (3.4)$$

² É possível que as combinações com um número reduzido de grupos, ou grupos com baixa capacidade de geração, não consigam satisfazer a carga.

sujeito a

$$\sum_{n=1}^N P_n = P_{carga} \quad (3.5)$$

$$P_n^{min} \leq P_n \leq P_n^{max} \quad (3.6)$$

As condições óptimas para o pré-despacho podem obter-se através da definição da função de Lagrange $\mathcal{L}$ [4]

$$\mathcal{L} = \sum_{n=1}^N C(P_n) + \lambda \cdot \left(P_{carga} - \sum_{n=1}^N P_n \right) \quad (3.7)$$

Calculando as derivadas parciais em ordem às potências geradas obtém-se os custos marginais dos grupos geradores.

$$\lambda = \frac{\partial C(P_n)}{\partial P_n} \quad (3.8)$$

A condição necessária para a existência de custo mínimo de operação é que o custo marginal λ de todas as unidades seja igual e sejam cumpridas todas as seguintes restrições:

$$\sum_{n=1}^N P_n = P_{carga}$$

$$P_n^{min} \leq P_n \leq P_n^{max}$$

O cálculo do pré-despacho óptimo é obtido com recurso à ferramenta *MatPower*, um programa que é incorporado no MATLAB. O recurso a esta ferramenta pode à primeira impressão não se reconhecer necessário e não ser valorizado, pois é considerada uma ferramenta poderosa e algo pesada para o que é pretendido inicialmente. Mas esta ferramenta tem a grande vantagem de permitir passarmos de uma situação em que não existe rede de interligação entre a produção e o consumo, para uma situação em que possa existir uma rede de interligação, passando a existir limites de trânsitos de potência. Assim, passamos de uma rede com nó único, ou seja, sem perdas, para uma situação em que existe uma rede com várias linhas entre a produção e o consumo e portanto passam a existir perdas na rede. Com esta ferramenta aumenta-se um pouco o tempo de execução do programa, mas tem outras vantagens que permitem uma análise mais próxima da realidade caso seja pretendido.

3.4.4 - Modelo matemático

A abordagem utilizada para a resolução da programação dinâmica, foi a abordagem *forward* (pesquisa para a frente), cuja fórmula de recorrência é dada por

$$F(i, j) = \min_k [C(i, j) + T((i-1, k) - (i, j)) + F(i-1, k)] \quad (3.9)$$

onde i é o período, j o estado actual e k indica os diversos estados do período anterior. $F(i, j)$ é o custo total desde o início associado ao estado j , $C(i, j)$ é o custo total da combinação j no período i , e T representa os custos de transição entre o estado k e i , sendo que esse valor pode ser nulo caso não existam arranques ou paragens nessa transição. Na Tabela 3.2 é representada a matriz que inclui os valores da fórmula de recorrência e o escalonamento para o período i e estado j .

Tabela 3.2 — Modelo da matriz para o escalonamento e custo da função $F(i, j)$ - Matriz F

Período (i)	$F(i, j)$	G1	G2	G3	...	Gn
0	0	0	1	0	...	0
1	16872,2	1	1	0	...	0
1	17539,1	1	1	1	...	0
...	...	...	...	...	...	...

Após o pré-despacho procede-se ao cálculo das trajectórias possíveis entre períodos e estados tendo em conta nesta fase os custos de ligação e de paragem das máquinas calculados nas transições entre os vários períodos. Podem ser definidas diversas trajectórias (Figura 3.3), cada uma correspondendo à escolha de um estado em cada período. As trajectórias para além dos custos de funcionamento de cada estado, incluem também as transições, isto é, os custos de ligar ou desligar as máquinas se tal ocorrer.

3.4.5 - Escolha da melhor trajectória

A Figura 3.3 dá uma ideia da situação após definidos os estados em cada período. Podem ser definidas diversas trajectórias, cada uma correspondente à selecção de um estado em cada período, ficando associado a cada trajectória um custo global que é a soma dos custos totais de funcionamento de todos os estados e dos custos de transição entre cada par de estados consecutivos.

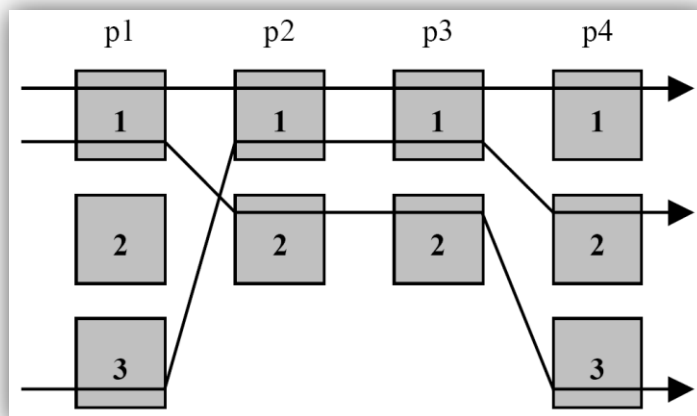


Figura 3.3 - Estados e transições entre períodos [2].

No final, tal como traduz a metodologia apresentada no fluxograma da Figura 3.2, o problema passa por se encontrar a trajectória óptima, obtendo-se um custo global de produção mínimo composto pelas transições e pelos custos de funcionamento de cada estado dos vários períodos.

A aplicação do princípio da optimalidade que é a base da programação dinâmica está implícita na fórmula de recorrência. Em termos simplificados, dir-se-á que qualquer trajectória, candidata a óptima, que vá dum certo estado intermédio até ao fim, terá que ter tido um percurso óptimo nos períodos anteriores [2].

3.5 - Construção de indicadores de ajuda à decisão

Após realizar o escalonamento e pré-despacho através da programação dinâmica, passamos a ter o escalonamento óptimo para as diferentes alternativas. Mas, agora é necessário fazer uma avaliação das consequências, caso ocorra outro cenário que não aquele para o qual foi feito o escalonamento, ou seja, avaliar as consequências de ocorrerem os diferentes cenários alternativos.

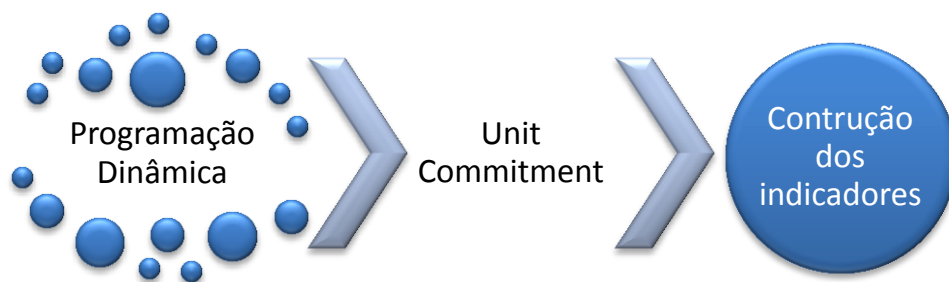


Figura 3.4 - Passos base para a construção dos indicadores.

De modo a tomar uma decisão de escolha de uma alternativa de escalonamento, é necessário construir um conjunto de indicadores, para isso seguem-se os seguintes passos:

1. Se para cada período de escalonamento, o somatório das potências máximas das máquinas escaladas for inferior à carga menos a produção eólica, ou seja:

$$\sum_m P_m^{max} < P_{carga} - P_{eólica} \quad (3.10)$$

significa que estamos perante uma situação em que existe corte de carga, sendo a quantidade de carga cortada dada por:

$$P_{carga} - \left(\sum_m P_m^{max} + P_{eólica} \right) \quad (3.11)$$

2. Se para cada período de escalonamento, o somatório das potências mínimas das máquinas escaladas for superior à carga menos a produção eólica, ou seja:

$$\sum_m P_m^{min} > P_{carga} - P_{eólica} \quad (3.12)$$

significa que são violados os mínimos técnicos das unidades térmicas, mas como isso não pode acontecer, estamos perante uma situação de desperdício de eólica, sendo a quantidade de eólica desperdiçada dada por:

$$\left(\sum_m P_m^{min} + P_{eólica} \right) - P_{carga} \quad (3.13)$$

3. Se para cada alternativa de escalonamento se verificar que:

$$\sum_m P_{max} < P_{carga} - P_{eólica} + R_{carga} + R_{eólica} \quad (3.14)$$

Isto significa que os limites de reserva não estão a ser cumpridos. Isto não constitui um problema eminente, mas ainda assim deve ser levado em consideração.

Após ser efectuada a construção dos indicadores é feito em cada alternativa e para diferentes cenários um novo redespacho dos geradores para o valor da carga térmica, ou seja, $P_{carga}(i) - P_{eólica}(i)$, onde é apresentado o novo custo de produção.

3.6 - Ajuda à decisão da melhor alternativa de escalonamento

Neste trabalho, não se pretende a implementação de um Sistema de Apoio à Decisão (SAD), mas sim a criação de indicadores que permitam uma análise de várias estratégias que podem ser definidas por uma Agente de Decisão (AD).

Futuramente, com a metodologia utilizada e de modo a fazer uma melhor análise das consequências associadas à volatilidade da produção eólica, a escolha da melhor alternativa de escalonamento, poderia ser feita com a implementação de um SAD, que pode ser efectuado com recurso a meta-heurísticas com algoritmos evolucionários. O conceito desta metodologia é explicado com maior detalhe nos trabalhos futuros, na secção 5.2. A razão de não ser feito já neste trabalho a implementação de um SAD com recurso a meta-heurísticas, prende-se com o limite de tempo para a sua conclusão, que seria muito superior ao que é reservado para o desenvolvimento da presente tese de dissertação.

Assim, apresentam-se a seguir dois modelos de análise com vista à ajuda à decisão para a escolha da melhor alternativa de escalonamento.

3.6.1 - Modelo 1

Esta escolha da melhor alternativa de escalonamento, consiste na escolha da alternativa que causa menores problemas, ou seja, aquela que evite consequências como o corte de carga, e/ou desperdício de eólica. Para isso foram criados níveis de problemas a solucionar.

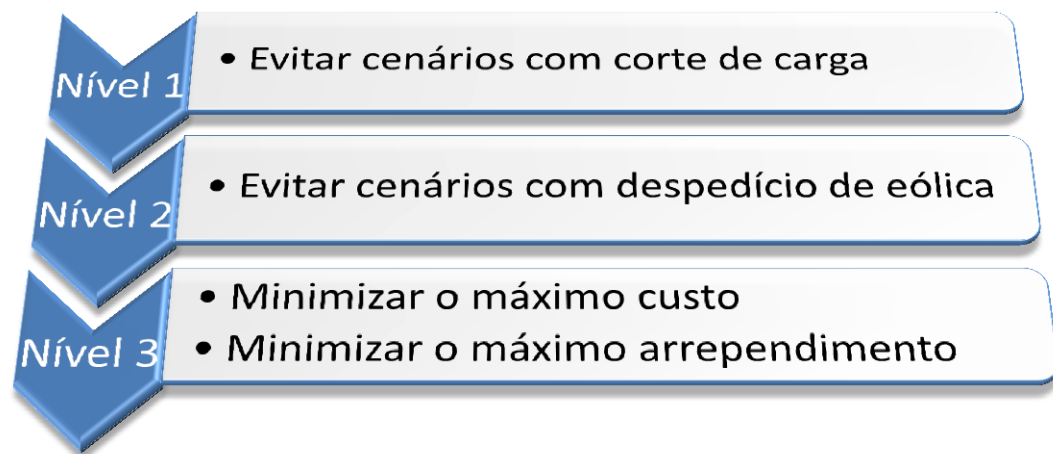


Figura 3.5 - Resumo dos níveis hierárquicos que devem ser seguidos

Nível 1

Se houver necessidade de efectuar corte de carga, então essa alternativa de escalonamento deve ser excluída.

Nível 2

Se houver necessidade de desperdício de produção eólica, então essa alternativa de escalonamento é excluída, ou caso não seja possível evitar alternativas com desperdício de eólica, então tenta-se minimizar o seu desperdício.

Podem também ser definidos níveis máximos de desperdício de eólica, isto seria uma regulação do agente de decisão.

Nível 3

Para as alternativas restantes, o último nível de análise para a escolha da melhor alternativa de escalonamento, é o custo de produção, que também se pretende minimizar. Nestas situações são apresentadas duas alternativas ao agente de decisão, que são:

1. Minimização do máximo custo;
2. Minimização do arrependimento máximo.

A razão para ser utilizada a minimização em relação ao máximo de cada alternativa, prende-se com a necessidade de evitar a pior situação que possa ocorrer, ou seja, evitar a situação mais desfavorável.

O conceito arrependimento está muito ligado com decisões tomadas sob incerteza e representa aquilo que se perde em relação à melhor alternativa.

3.6.2 - Modelo 2

Este segundo modelo, tem como base uma análise *trade-off*³, que representa um valor de compensação entre dois atributos α e β , ou seja, a relação entre o que é preciso perder em α para ganhar uma unidade em β .

Agora é possível agregar os três níveis apresentados no modelo 1 através da seguinte função de valor

$$[V] = [Custo_{Redespacho}] + [Corte_{Carga}] \cdot \alpha + [Desperdício_{Eólica}] \cdot \beta \quad (3.15)$$

Após o cálculo da função V, é possível apresentar novamente duas alternativas ao agente de decisão:

1. Minimização do máximo custo
2. Minimização do arrependimento máximo

3.7 - Implementação da metodologia apresentada

A partir da metodologia que se apresentou neste capítulo, desenvolveu-se um programa de raiz com recurso à programação dinâmica que tem como objectivo o cálculo do escalonamento e pré-despacho para vários cenários de produção eólica.

A implementação do programa para o cálculo do escalonamento e pré-despacho, foi testado para um exemplo presente num documento de Kazarlis [37]. Este exemplo é composto por 10 geradores e considera um horizonte temporal de 24 períodos. Os resultados obtidos para esta implementação são ligeiramente diferentes, ficando essa diferença a dever-se à consideração de diferentes pressupostos, ou seja, não são consideradas variáveis como o tempos mínimos de arranque e de paragem.

Numa segunda parte foi desenvolvido um módulo de avaliação para cada solução alternativa de despacho, em comparação com os diferentes cenários de produção eólica. Esta avaliação é feita a partir do escalonamento e pré-despacho realizado anteriormente e com recurso à construção de indicadores para os vários cenários, tal como se apresentou na secção 3.5.

³ Em português diz-se taxa de substituição

Capítulo 4

Apresentação e Análise dos Resultados

Nesta secção é feita a apresentação dos resultados obtidos em diversas simulações, através das ferramentas desenvolvidas e descritas no capítulo anterior desta dissertação. Deste modo pretende-se identificar e demonstrar os efeitos da volatilidade da produção eólica no escalonamento e pré-despacho.

O objectivo deste estudo não é a possibilidade de adaptar o modelo desenvolvido ao sistema nacional ou da mesma ordem de grandeza, derivado ao problema da dimensionalidade existente na programação dinâmica, já referido no Capítulo 2, que impossibilita a adaptação deste modelo a sistemas com muitos geradores.

Não sendo objectivo do estudo realizado e apesar de os diferentes exemplos utilizados não representarem concretamente nenhum sistema real, os valores utilizados traduzem sistemas realistas, redimensionados em todos os seus valores, para que seja assim possível efectuar um estudo e análise o mais próximo da realidade.

Assim, são considerados dois casos de estudo para análise, o primeiro apenas como exemplo ilustrativo e um segundo exemplo onde já são feitas várias simulações de modo a perceber como a produção eólica influencia o escalonamento e pré-despacho.

4.1 - Caso de estudo 1

Este primeiro caso de estudo é utilizado como um exemplo ilustrativo, pois trata-se de um exemplo de dimensões reduzidas, com apenas três geradores, quatro períodos e cinco cenários. O que permite uma melhor análise de alguns dos indicadores importantes ao estudo realizado.

4.1.1 - Dados de entrada

A Tabela 4.1 apresenta características dos geradores que foram consideradas para a realização do problema, como os limites mínimo e máximo de produção activa, os coeficientes associados aos custos de produção e por fim os custos de ligar e desligar cada unidade ao longo dos diferentes períodos.

Tabela 4.1 – Grupos Produtores

	P_{min} MW	P_{max} MW	a \$/h	b \$/MWh	c \$/((MWh) ² · h)	$C.lig.$ \$	$C.desl.$ \$
G_1	200	600	600	14	0,004	1000	120
G_2	180	500	500	15	0,005	700	180
G_3	110	400	400	16	0,009	400	300

A Tabela 4.2 apresenta os valores da carga que é necessário alimentar em cada período, e a contribuição da produção eólica através dos vários cenários de produção, nos diferentes períodos de tempo.

Tabela 4.2 – Carga (MW) e produção eólica (MW) para os diferentes cenários

Período	Carga	Cenário				
		1	2	3	4	5
1	900	92	300	0	325	5
2	300	104	150	10	150	15
3	200	87	90	5	90	10
4	700	108	200	15	400	20

A Tabela 4.3 apresenta as condições iniciais, ou anteriores ao ponto em que é iniciado a resolução do problema. A Tabela 4.4 apresenta os valores de reserva para a produção eólica e para a carga.

Tabela 4.3 – Condições anteriores (iniciais)

Período	Custo	G_1	G_2	G_3
0	0	0	1	0

Tabela 4.4 – Valores de reserva

Carga	Eólica
10%	15%

4.1.2 - Resultados obtidos

Neste primeiro grupo de resultados obtidos para este exemplo, Tabela 4.5, apresenta-se o escalonamento e pré-despacho para cada período e considerando os vários cenários de produção eólica.

Tabela 4.5 – Valores para o escalonamento e despacho em cada período e o custo associado

<i>Alternativa</i>	<i>Período</i>	<i>Custo (\$)</i>	<i>Despacho (MW)</i>			<i>P_{min}</i>	<i>P_{max}</i>	<i>Carga</i>	<i>Eólica</i>
			<i>G₁</i>	<i>G₂</i>	<i>G₃</i>	<i>MW</i>			
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	15194	504	304	0	380	1100	900	92
1	2	18946	0	196	0	180	500	300	104
1	3	21849	0	0	113	110	400	200	87
1	4	33395	482	0	110	310	1000	700	108
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	11654	0	421	179	290	900	900	300
2	2	14836	0	0	150	110	400	300	150
2	3	17105	0	0	110	110	400	200	90
2	4	27005	500	0	0	200	600	700	200
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	16872	556	344	0	380	1100	900	0
3	2	22263	0	290	0	180	500	300	10
3	3	25878	0	195	0	180	500	200	5
3	4	38887	436	249	0	380	1100	700	15
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	11175	0	405	170	290	900	900	325
4	2	14358	0	0	150	110	400	300	150
4	3	16627	0	0	110	110	400	200	90
4	4	23077	0	300	0	180	500	700	400
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	16780	553	342	0	380	1100	900	5
5	2	22081	0	285	0	180	500	300	15
5	3	25612	0	190	0	180	500	200	10
5	4	38534	433	247	0	380	1100	700	20

Na Tabela 4.5, é apresentada a produção de cada unidade, bem como os valores mínimo e máximo que é possível produzir em cada período, tendo em conta o escalonamento que foi feito das unidades. Importa também referir o custo ao longo de cada período para os diferentes cenários, que é resultado do custo de produção mais o custo de arranque ou paragem das unidades de produção. Outra observação importante relaciona-se com o escalonamento obtido, em que vemos que das 5 alternativas, a 3 e a 5 tem o mesmo escalonamento de máquinas térmicas, isto deve-se às dimensões reduzidas deste caso de estudo, assim na realidade, apenas seriam consideradas 4 alternativas.

No segundo grupo de resultados são apresentadas as alternativas de escalonamento e as consequências que podem ocorrer para os diferentes cenários. São elas o corte de carga, Tabela 4.6, o desperdício de eólica, Tabela 4.7 e o custo de redespacho, Tabela 4.8.

Tabela 4.6 – Corte de Carga (MW)

<i>Alternativa</i>	<i>Cenário</i>					<i>Max</i>
	1	2	3	4	5	
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	85	0	80	85
3	0	0	0	0	0	0
4	92	0	185	0	180	185
5	0	0	0	0	0	0

Tabela 4.7 – Desperdício de eólica (MW)

<i>Alternativa</i>	<i>Cenário</i>					<i>Max</i>
	1	2	3	4	5	
1	0	30	0	40	0	40
2	0	0	0	0	0	0
3	67	100	0	180	0	180
4	0	0	0	0	0	0
5	67	100	0	180	0	180

Tabela 4.8 – Custo de redespacho (k\$)

<i>Alternativa</i>	<i>Cenário</i>					<i>Max</i>
	1	2	3	4	5	
1	30,70	25,11	37,24	21,57	36,87	37,24
2	31,93	25,12	37,59	21,21	37,27	37,59
3	31,59	26,11	36,77	23,76	36,41	36,77
4	30,89	25,77	36,40	21,50	36,08	36,40
5	31,59	26,11	36,77	23,76	36,41	36,77

4.1.3 - Ajuda à decisão

O modelo de ajuda à decisão que se apresenta a seguir é baseado na metodologia já definida na secção 3.6. Neste primeiro caso de estudo, apenas se vai usar o primeiro modelo que se encontra estruturado por três níveis de prioridade a ser seguidos para a escolha da melhor alternativa.

Para definir o nível 1, analisa-se a Tabela 4.6, onde elegemos as alternativas em que não existe corte de carga, e assim são seleccionadas as alternativas 1, 3 e 5. Para o nível 2, analisa-se a Tabela 4.7, de forma a minimizar o máximo desperdício de eólica, e assim das alternativas que foram seleccionadas no nível 1, a alternativa 1 é que a tem menor máximo de desperdício de eólica. Com estes passos temos definida a melhor alternativa, onde é possível concluir que a melhor alternativa de escalonamento para esta estratégia é a alternativa 1.

Após esta primeira análise pode verifica-se que o facto de ocorrer uma produção eólica inferior à prevista pode levar a uma situação de corte de carga, situação em que a reserva utilizada não foi suficiente, sendo o caso mais grave a alternativa 4. Por outro lado, os cenários em que há desperdício de eólica reflectem uma situação em que houve um aumento de produção eólica em relação ao previsto e no redespacho, as unidades térmicas atingiram os limites mínimos técnicos de produção, sendo as alternativas 3 e 5 o pior caso para este estudo, que na realidade, como já foi dito anteriormente, ambas tem o mesmo escalonamento e portanto pode ser considerada como uma única alternativa.

Tabela 4.9 – Arrependimento em relação ao custo de redespacho (\$)

<i>Alternativa</i>	<i>Cenário</i>					<i>Max</i>
	1	2	3	4	5	
1	0	0	840	366	788	840
2	1231	18	1190	0	1190	1231
3	895	1007	368	2552	334	2552
4	191	668	0	290	0	668
5	895	1007	368	2552	334	2552

Considerando agora uma estratégia em que tanto o corte de carga como o desperdício de eólica não são considerados. Assim, seria proposta uma estratégia de minimizar o máximo custo de redespacho, Tabela 4.8, e minimizar o máximo arrependimento, Tabela 4.9.

Deste modo, nesta terceira estratégia em que se ignora momentaneamente o corte de carga e desperdício de eólica, verifica-se que a alternativa 4 é aquela que apresenta menor valor tanto para o máximo custo de redespacho como para o máximo arrependimento entre as alternativas.

4.2- Caso de estudo 2

Este segundo caso de estudo já se trata de um problema de maior dimensão, assumindo características realistas, embora com ainda um número limitado de máquinas. É um problema constituído por sete máquinas térmicas, onde se pretende fazer o escalonamento e pré-despacho para um intervalo de tempo composto por vinte e quatro períodos (1 dia) e onde são usados sete cenários possíveis de vento, sendo que todos os cenários têm igual probabilidade de ocorrência.

4.2.1 - Dados de entrada

A Tabela 4.10 apresenta as características dos geradores que foram consideradas para a realização deste problema, como os limites mínimo e máximo de produção activa, os coeficientes associados aos custos de produção e por fim os custos de ligar e desligar cada unidade ao longo dos diferentes períodos, neste caso, os custos de desligar as unidades térmicas foram considerados nulos.

Tabela 4.10 – Grupos Produtores

	P_{min}	P_{max}	a	b	c	$C.lig.$	$C.desl.$
	MW	MW	$\$/h$	$\$/MWh$	$\$/((MWh)^2 \cdot h)$	$\$$	$\$$
G_1	150	500	1000	16,19	0,00048	9000	0
G_2	150	455	970	17,26	0,00031	10000	0
G_3	20	130	700	16,60	0,002	1100	0
G_4	20	130	680	16,50	0,00211	1120	0
G_5	25	162	450	19,70	0,00398	1800	0
G_6	20	80	370	22,26	0,00712	340	0
G_7	25	85	480	27,74	0,00079	520	0

A Tabela 4.11 apresenta os valores da carga que é necessário alimentar em cada período, e a contribuição da produção eólica representada através dos cenários de produção nos diferentes períodos de tempo.

A Tabela 4.12 apresenta as condições iniciais, ou anteriores ao ponto em que é iniciado a resolução do problema e a Tabela 4.13 apresenta os valores de reserva para a produção eólica e para a carga.

Tabela 4.11 – Carga (MW) e produção eólica (MW) para os 7 cenários, nos 24 períodos.

<i>Período</i>	<i>Carga</i>	<i>Cenário</i>						
		1	2	3	4	5	6	7
1	700	484	293	478	511	432	491	360
2	750	542	264	441	562	462	496	456
3	850	622	294	720	659	631	585	324
4	950	560	453	663	526	632	515	294
5	1000	649	533	794	650	615	529	615
6	1100	639	551	835	428	859	859	635
7	1150	510	378	741	612	913	822	643
8	1200	745	400	723	332	750	592	523
9	1300	649	537	693	205	568	686	532
10	1400	475	394	350	125	353	419	129
11	1450	361	298	581	128	120	662	139
12	1500	365	361	553	411	195	170	528
13	1400	347	383	161	205	118	458	152
14	1300	164	67	173	155	69	216	159
15	1200	102	41	147	63	75	120	88
16	1050	94	43	128	69	69	124	14
17	1000	48	36	71	52	90	52	12
18	1100	60	54	103	129	60	123	6
19	1200	122	122	186	96	164	145	24
20	1400	130	96	347	180	137	304	43
21	1300	166	101	260	122	133	214	65
22	1100	112	123	299	205	159	265	92
23	900	181	85	127	58	132	230	29
24	800	178	107	58	79	110	114	76

Tabela 4.12 – Condições anteriores (iniciais)

<i>Período</i>	<i>Custo</i>	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	G_7
0	0	1	1	0	0	0	0	0

Tabela 4.13 – Valores de reserva

Carga	Eólica
10%	15%

Podemos apresentar também os valores da carga que é necessário alimentar em cada período, e a contribuição da produção eólica, já apresentados na Tabela 4.11, mas agora de forma gráfica.

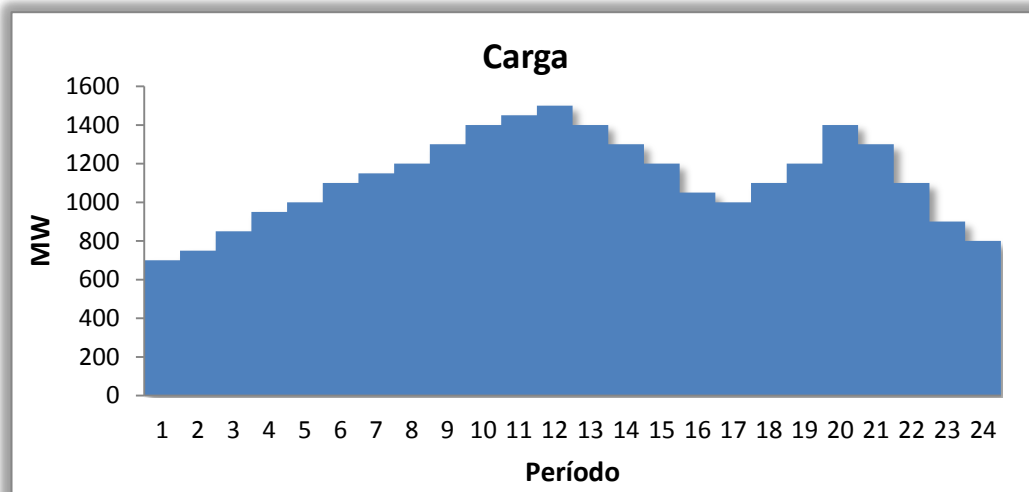


Figura 4.1 - Apresentação gráfica da carga em cada período

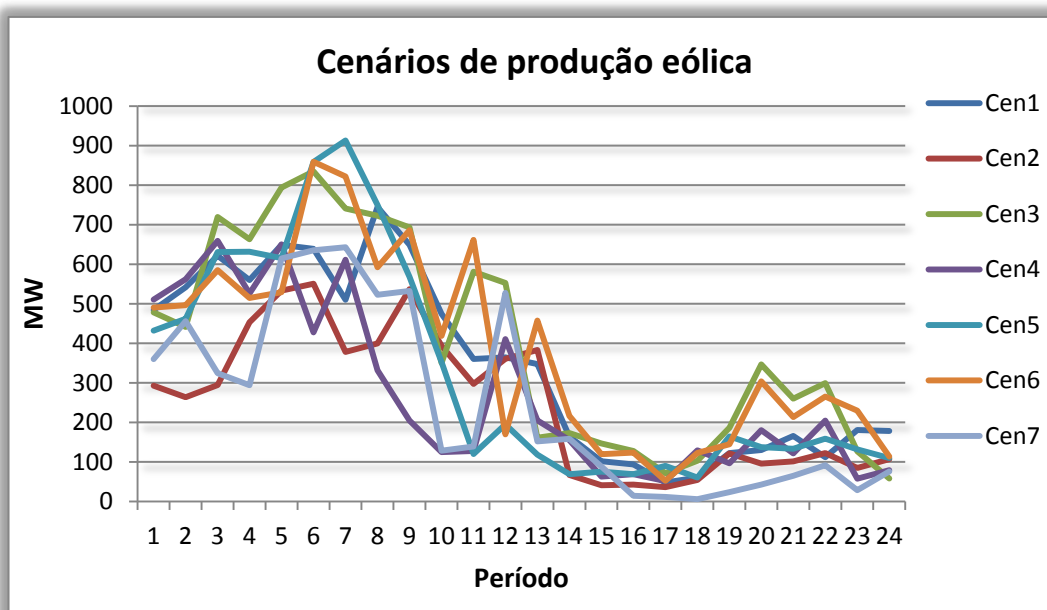


Figura 4.2 - Apresentação gráfica dos cenários de produção eólica em cada período

4.2.2 - Resultados obtidos

Nos resultados obtidos deste exemplo, optou-se por não incluir os valores do escalonamento e pré-despacho, pois para este exemplo já se trata de uma tabela muito extensa e entende-se que as tabelas seguintes resumem o que interessa analisar.

Apresentamos assim o segundo grupo de resultados que representam as consequências de ocorrer outro cenário, que não o cenário para o qual foi feito o escalonamento e pré-despacho. As consequências são o corte de carga, Tabela 4.14, o desperdício de eólica, Tabela 4.15 e o custo de redespacho, Tabela 4.16.

Tabela 4.14 – Corte de Carga (MW)

<i>Alternativa</i>	<i>Cenário</i>							<i>max</i>
	1	2	3	4	5	6	7	
1	0	56	0	168	35	0	127	168
2	0	0	0	28	0	0	24	28
3	23	454	0	239	157	83	397	454
4	0	132	0	0	0	0	71	132
5	140	377	0	378	0	0	133	378
6	0	201	0	293	248	0	325	325
7	0	0	0	60	0	0	0	60

Tabela 4.15 – Desperdício de eólica (MW)

<i>Alternativa</i>	<i>Cenário</i>							<i>max</i>
	1	2	3	4	5	6	7	
1	0	0	55	0	122	59	0	122
2	248	0	390	332	247	231	6	390
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	162	0	122	59	0	162
5	0	0	20	0	0	0	0	20
6	0	0	20	0	0	0	0	20
7	72	0	312	109	203	94	0	312

Tabela 4.16 – Custo de redespacho (k\$)

<i>Alternativa</i>	<i>Cenário</i>							<i>max</i>
	1	2	3	4	5	6	7	
1	375,9	414,5	354,6	404,3	387,1	361,8	417,1	417,1
2	388,5	423,1	368,4	420,6	397,5	373,2	425,7	425,7
3	375,9	412,4	352,4	405,1	383,3	359,5	415,3	415,3
4	383,6	421,1	363,4	413,5	394,7	369,2	424,7	424,7
5	375,8	410,8	355,6	402,5	386,7	362,8	419,0	419,0
6	375,5	412,1	352,4	402,5	380,5	358,8	413,5	413,5
7	386,9	424,8	368,4	417,4	398,2	372,3	426,6	426,6

4.2.3 - Ajuda à decisão

Os modelos de ajuda à decisão que se apresentam a seguir são baseados na metodologia já definida na secção 3.6.

4.2.3.1 - Modelo 1

Este primeiro modelo encontra-se estruturado por três níveis de prioridade a serem seguidos para a escolha da melhor alternativa.

Para definir o nível 1, analisa-se a Tabela 4.14, mas como não existe nenhuma alternativa em que não haja corte de carga, define-se como corte de carga máximo nunca superior a 100 MW, e assim são seleccionadas as alternativas 2 e 7. Para o nível 2, analisa-se a Tabela 4.15, de forma a minimizar o máximo desperdício de eólica, e assim das alternativas que foram seleccionadas no nível 1, a alternativa 7 é que a tem menor máximo de desperdício de eólica. Com estes passos temos definida a melhor alternativa, onde é possível concluir que a melhor alternativa de escalonamento para esta estratégia é a 7.

Vamos agora utilizar uma segunda estratégia, em que se mantém o nível 1 igual à estratégia anterior, ou seja, corte de carga máximo nunca superior a 100 MW. Mas agora considera-se que o nível 2 não é considerado, ou seja, não é analisado o desperdício de eólica, pois a produção eólica excedente pode ser canalizada para outros recursos, ou simplesmente o desperdício de eólica é um problema menor. Assim, após o nível 1, onde se mantêm seleccionadas as alternativas 2 e 7, passamos directamente para o nível 3 e analisa-se a Tabela 4.16, de modo a minimizar o máximo custo de redespacho, o que nos leva agora a que alternativa 2 seja a melhor.

Numa terceira estratégia, vamos considerar que tanto o corte de carga como o desperdício de eólica não são considerados, pois existem formas de evitar que sucedam. Assim, seria proposta uma estratégia de minimizar o máximo custo de redespacho, Tabela 4.16, e minimizar o máximo arrendimento, Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Arrendimento em relação ao custo de redespacho (\$)

<i>Alternativa</i>	<i>Cenário</i>							<i>max</i>
	1	2	3	4	5	6	7	
1	384	3624	2232	1834	6585	3018	3527	6585
2	12994	12294	15954	18111	16997	14413	12169	18111
3	333	1595	0	2683	2785	680	1791	2785
4	8096	10221	10963	11023	14120	10363	11123	14120
5	239	0	3192	29	6188	3937	5435	6188
6	0	1289	30	0	0	0	0	1289
7	11350	13979	15955	14899	17657	13467	13016	17657

Deste modo, nesta terceira estratégia em que se ignora momentaneamente o corte de carga e desperdício de eólica, verifica-se que a alternativa 6 é aquela que apresenta menor valor tanto para o máximo custo de redespacho como para o máximo arrependimento entre as alternativas.

4.2.3.2 - Modelo 2

Este segundo modelo, tem como base a avaliação da função de valor V , que depende dos valores de α e β , que são especificados pelos AD, em que α representa o custo por megawatt-hora de carga que foi cortada e β representa o custo por megawatt-hora de produção eólica que foi desperdiçada. Assim, a função V é dada por:

$$[V] = [Custo_{Redespacho}] + [Corte_{Carga}] \cdot \alpha + [Desperdício_{Eólica}] \cdot \beta$$

onde α e β , tem os seguintes valores:

Tabela 4.18 – Trade-offs

α	β
\$/MWh	\$/MWh
5000	1000

Considerando os valores da Tabela 4.18, para os valores de α e β , obtemos os seguintes valores da função V na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Custo equivalente à função V (k\$)

<i>Alternativa</i>	<i>Cenário</i>							<i>max</i>
	1	2	3	4	5	6	7	
1	376	694	410	1244	684	421	1052	1244
2	637	423	758	893	645	604	552	893
3	491	2682	352	1600	1168	774	2400	2682
4	384	1081	525	413	517	428	780	1081
5	1076	2296	376	2292	387	363	1084	2296
6	376	1417	372	1867	1621	359	2039	2039
7	459	425	680	826	601	466	427	826

Como se pretende minimizar o máximo custo da função V , então a melhor alternativa de escalonamento, neste segundo modelo, é a alternativa 7.

4.2.4 - Alterando o nível de reserva

O caso de estudo mantém-se em tudo igual, com a diferença dos valores de reserva utilizados para a carga e para produção eólica. Os valores de reserva que agora são usados estão apresentados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Valores de reserva

Carga	Eólica
10%	30%

4.2.5 - Resultados obtidos

Apresentamos aqui os resultados que representam as alternativas de escalonamento e as consequências que podem ocorrer em diferentes cenários. As consequências são o corte de carga, Tabela 4.21, desperdício de eólica, Tabela 4.22 e o custo de redespacho, Tabela 4.23.

Tabela 4.21 – Corte de Carga (MW)

<i>Alternativa</i>	<i>Cenário</i>							<i>max</i>
	1	2	3	4	5	6	7	
1	0	56	0	28	0	0	50	56
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	99	0	85	83	3	163	163
4	0	56	0	0	0	0	26	56
5	0	166	0	10	0	0	26	166
6	0	30	0	113	118	0	114	118
7	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 4.22 – Desperdício de eólica (MW)

<i>Alternativa</i>	<i>Cenário</i>							<i>max</i>
	1	2	3	4	5	6	7	
1	0	0	162	0	122	59	0	162
2	248	0	390	332	272	231	6	390
3	0	0	0	0	88	0	0	88
4	0	0	162	0	122	59	0	162
5	0	0	20	0	0	0	0	20
6	0	0	40	0	0	0	0	40
7	72	0	312	109	203	94	0	312

Tabela 4.23 – Custo de redespacho (k\$)

<i>Alternativa</i>	<i>Cenário</i>							<i>max</i>
	1	2	3	4	5	6	7	
1	379,5	418,0	360,0	410,6	391,2	365,4	421,1	421,1
2	391,8	426,4	371,7	424,3	401,0	376,5	429,2	429,2
3	379,8	420,4	356,3	410,3	389,6	364,7	422,8	422,8
4	383,8	422,0	363,9	413,9	394,9	369,7	424,6	424,6
5	382,8	419,3	360,2	413,8	391,0	367,2	424,1	424,1
6	379,1	419,4	356,6	409,2	386,7	363,1	420,6	420,6
7	389,0	427,4	370,6	420,2	400,4	374,5	428,9	428,9

4.2.6 - Ajuda à decisão

Os modelos de ajuda à decisão que se apresentam a seguir são baseados na metodologia já definida na secção 3.6.

4.2.6.1 - Modelo 1

Este primeiro modelo encontra-se estruturado por três níveis de prioridade a serem seguidos para a escolha da melhor alternativa.

Para definir o nível 1, analisa-se a Tabela 4.21, e escolhem-se as alternativas de escalonamento em que não haja corte de carga, assim são seleccionadas as alternativas 2 e 7. Para o nível 2, analisa-se a Tabela 4.22, de forma a minimizar o máximo desperdício de eólica, e assim das alternativas que foram seleccionadas no nível 1, a alternativa 7 é que a tem menor máximo de desperdício de eólica. Com estes passos temos definida a melhor alternativa, onde é possível concluir que a melhor alternativa de escalonamento para esta estratégia é a alternativa 7.

Vamos agora utilizar uma segunda estratégia, em que para o nível 1 é definido o corte de carga máximo nunca superior a 60 MW e assim são seleccionadas as alternativas 1,2,4 e 7. Para o nível 2, minimiza-se o máximo desperdício de eólica das alternativas seleccionadas no nível 1, ficando agora apenas a alternativa 1 e 4. Como mesmo assim ainda restam duas alternativas possíveis, passamos ao nível 3. Este consiste em minimizar o máximo custo de redespacho, o que nos leva agora a que alternativa 1 seja a melhor. A mesma conclusão pode ser obtida se para o nível 3 analisarmos o mínimo arrependimento máximo do custo de redespacho, Tabela 4.24, o que nos leva novamente à alternativa 1 como a melhor alternativa.

Tabela 4.24 – Arrependimento em relação ao custo de redespacho (\$)

<i>Alternativa</i>	<i>Cenário</i>							<i>max</i>
	1	2	3	4	5	6	7	
1	372	0	3629	1373	4534	2251	448	4534
2	12662	8464	15362	15124	14337	13388	8589	15362
3	708	2419	0	1078	2931	1559	2219	2931
4	4685	4033	7520	4694	8171	6541	4000	8171
5	3690	1294	3860	4643	4340	4121	3464	4643
6	0	1388	309	0	0	0	0	1388
7	9884	9421	14256	11061	13723	11329	8292	14256

Numa terceira estratégia, vamos considerar que tanto o corte de carga como o desperdício de eólica não são considerados, pois existem formas de evitar que sucedam. Assim, seria proposta uma estratégia de minimizar o máximo custo de redespacho, Tabela 4.23, e minimizar o máximo arrependimento, Tabela 4.24.

Assim, nesta terceira estratégia em que se ignora momentaneamente o corte de carga e desperdício de eólica, verifica-se que a alternativa 6 é aquela que apresenta menor valor tanto para o máximo custo de redespacho como para o máximo arrependimento entre as alternativas.

4.2.6.2 - Modelo 2

Este segundo modelo, apresenta os mesmos valores de α e β que o exemplo anterior e que são especificados pelos AD. Assim, considerando os mesmos valores da Tabela 4.18, obtemos os valores da função V na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 – Custo associado à função V (k\$)

<i>Alternativa</i>	<i>Cenário</i>							<i>max</i>
	1	2	3	4	5	6	7	
1	380	698	522	551	513	424	671	698
2	640	426	762	756	673	608	435	762
3	380	915	356	835	893	380	1238	1238
4	384	702	526	414	517	429	555	702
5	383	1249	380	464	391	367	554	1249
6	379	569	397	974	977	363	991	991
7	461	427	683	529	603	468	429	683

Como se pretende minimizar o custo da função V, então a melhor alternativa de escalonamento, neste segundo modelo, é a alternativa 7.

Tabela 4.26 – Arrependimento em relação aos custos da função V (\$)

<i>Alternativa</i>	<i>Cenário</i>							<i>max</i>
	1	2	3	4	5	6	7	
1	372	271536	165629	136680	122193	61251	242157	271536
2	260662	0	405362	342431	281997	244388	6297	405362
3	708	488955	0	421385	501591	16559	808927	808927
4	4685	275569	169520	0	125831	65541	125708	275569
5	3690	822830	23860	49950	0	4121	125172	822830
6	0	142923	40309	560306	585660	0	561708	585660
7	81884	957	326256	115367	212383	105329	0	326256

Analisando agora o arrependimento em relação à função V, Tabela 4.26, de modo a minimizar o arrependimento máximo, verificamos que a melhor solução é a alternativa 1.

Para terminar a análise deste segundo caso de estudo, uma análise às tabelas em anexo, Tabela A.1 e Tabela A.2, permitem verificar que os escalonamentos são todos diferentes para estes dois níveis de reserva estudados.

4.3 - Influência dos níveis de reserva

Para perceber de que forma é que os níveis de reserva influenciam o escalonamento e pré-despacho, foi analisado o caso de estudo 2, já referido em 4.2, mas agora fez-se variar os níveis de reserva total de 0% até 40%, com intervalos de 5%.

Como o caso de estudo é o mesmo, os resultados são semelhantes aos já analisados em 4.2, pelo que não vamos apresentar nesta secção as tabelas detalhadas como anteriormente. Assim, vamos analisar a evolução dos diferentes parâmetros em termos gráficos, de modo a termos uma melhor percepção das alterações.

O custo final de despacho, que representa o custo de funcionamento das unidades de geração em cada período mais os custos de ligar e desligar as unidades, é apresentado no seguinte gráfico.

Observando a Figura 4.3, podemos verificar que os custos finais de despacho aumentam com o aumento dos valores da reserva. Esta proporcionalidade directa deve-se a que com o aumento da reserva, obriga a que seja maior o número de unidades térmicas que se encontram ligadas, aumentando o custo.

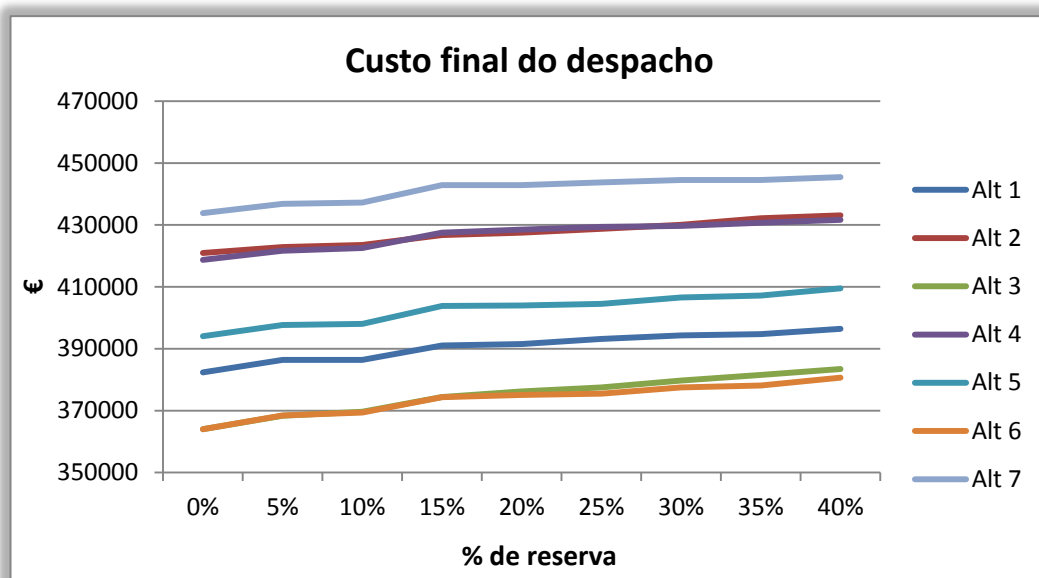


Figura 4.3 - Evolução dos custos finais de despacho para cada alternativa.

O corte de carga é a consequência que mais problemas pode causar, daí ser considerada como sendo o primeiro nível de consequências a evitar. Na realidade do SEE, o corte de carga devido à falta de recursos de geração, normalmente não acontece, pois há a possibilidade de recorrer a unidades de arranque rápido de modo a satisfazer a totalidade da carga, mas esta possibilidade tem geralmente custos elevados, fazendo com que esta deva ser evitada.

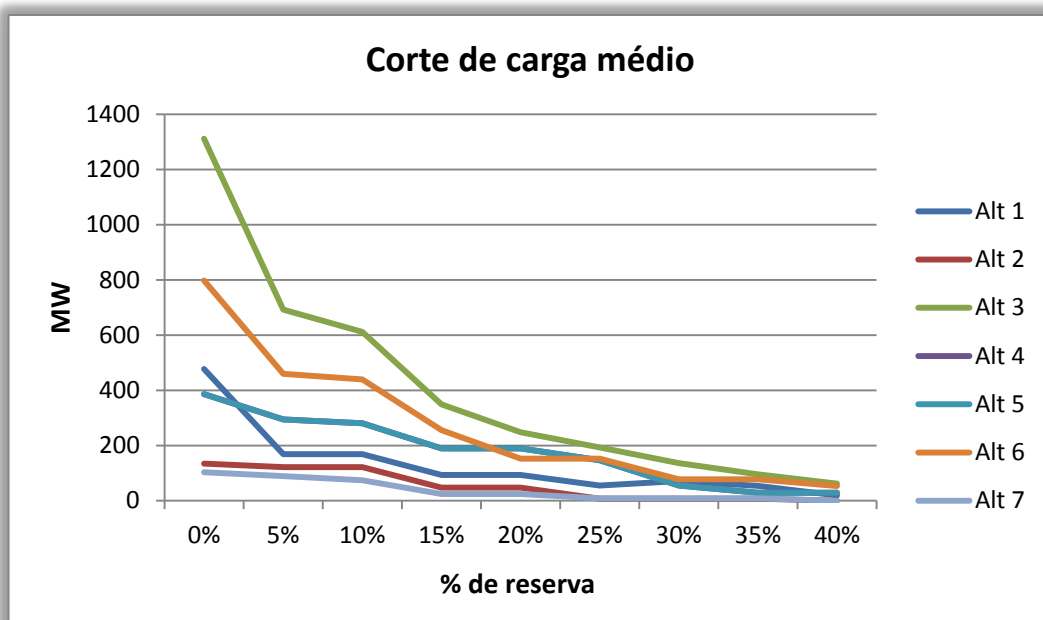


Figura 4.4 - Evolução do corte de carga médio para cada alternativa.

Na Figura 4.4, é apresentado a evolução do corte de carga médio, onde se pode verificar que diminui com o aumento da reserva, assim o corte de carga é inversamente proporcional ao aumento da reserva.

Esta diminuição do corte de carga, à medida que aumenta a reserva está relacionada com o aumento da robustez do sistema à medida que aumenta reserva. Pois se aumenta a margem de produção entre o que cada unidade está a produzir e a sua capacidade máxima de produção, então a diminuição da produção eólica pode, em certos casos, ser compensada pelo aumento de produção das unidades térmicas já escaladas.

Na Figura 4.5, mostra-se a evolução do desperdício de produção eólica médio com o aumento do nível de reserva.

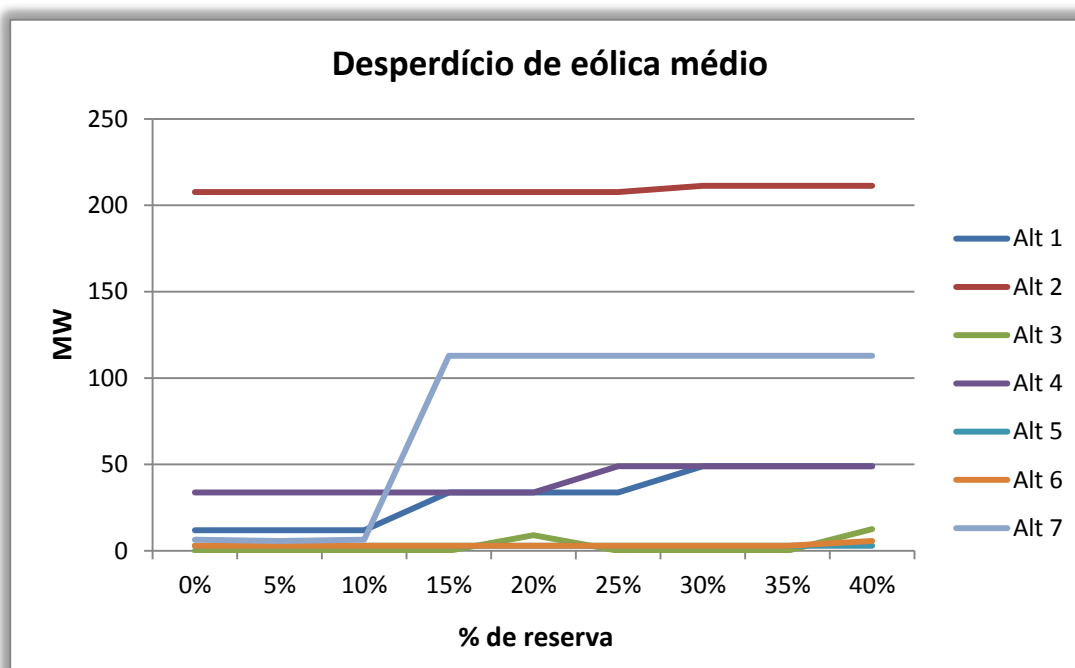


Figura 4.5 - Evolução do desperdício médio para cada alternativa.

A evolução do desperdício de eólica não é tão evidente como nos casos anteriores, mas ainda assim é perceptível na Figura 4.5 que o aumento de reserva provoca em grande parte das situações um aumento do desperdício de produção eólica. Este aumento do desperdício de eólica está relacionado com o aumento do número de unidades térmicas que são escaladas, que neste caso, como tem de cumprir os limites mínimos técnicos, se houver um aumento de produção eólica parte dessa produção é desperdiçada. Na realidade do SEE, o excesso de produção eólica, é muitas vezes utilizado para a combinação com a produção hídrica com bombagem, mas esta situação nem sempre é possível, sendo muitas por vezes desperdiçada a produção eólica.

O redespacho é feito quando ocorre outro cenário que não o cenário para o qual foi feito o escalonamento, havendo assim necessidade de proceder a um novo despacho, mas para o mesmo escalonamento previamente feito. Este novo despacho tem por isso novos valores de produção para cada unidade térmica e consequentemente novos custos.

A evolução do custo de redespacho médio com a reserva é apresentada no seguinte gráfico, Figura 4.6.

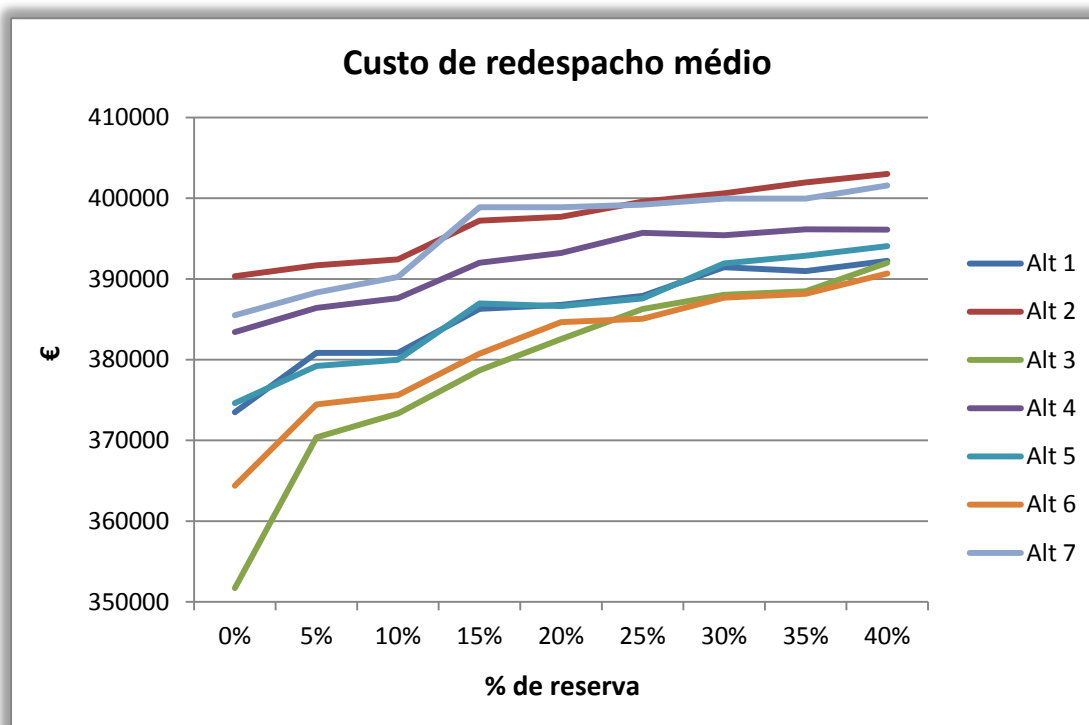


Figura 4.6 - Evolução do custo médio de redespacho para cada alternativa.

Observando a Figura 4.6, podemos verificar que os custos de redespacho aumentam com o aumento dos valores da reserva. Esta proporcionalidade directa, em semelhança com o que acontece para o custo total de despacho, Figura 4.3, deve-se a que o aumento da reserva obriga a que seja maior o número de unidades térmicas que se encontram ligadas, e assim aumenta o custo.

A razão de terem sido utilizados os valores médios para o corte de carga, desperdício de produção eólica e para o custo de redespacho, tem a ver que o facto de o valor médio transmitir o que se passa ao longo de todos os cenários para a mesma alternativa, já que os valores máximos utilizados no modelo de decisão, apenas mostram o pior caso e não é possível ter uma evolução das consequências do aumento da reserva.

Na Figura 4.7, mostra-se a evolução do número de situações em que há desperdício de produção eólica com o aumento do nível de reserva, em cada alternativa.

À semelhança do que acontecia com a evolução do desperdício de eólica médio, a evolução do número de situações em que há desperdício de produção eólica não é tão

evidente como nos casos anteriores, mas ainda assim é perceptível na Figura 4.7 que o aumento de reserva provoca, em grande parte das situações, um aumento do número de situações em que há desperdício da produção eólica. Este aumento do número de situações em que há desperdício de produção eólica está relacionado com o aumento do número de unidades térmicas que são escaladas, que neste caso, como tem de cumprir os limites mínimos técnicos, se houver um aumento de produção eólica parte dessa produção é desperdiçada.

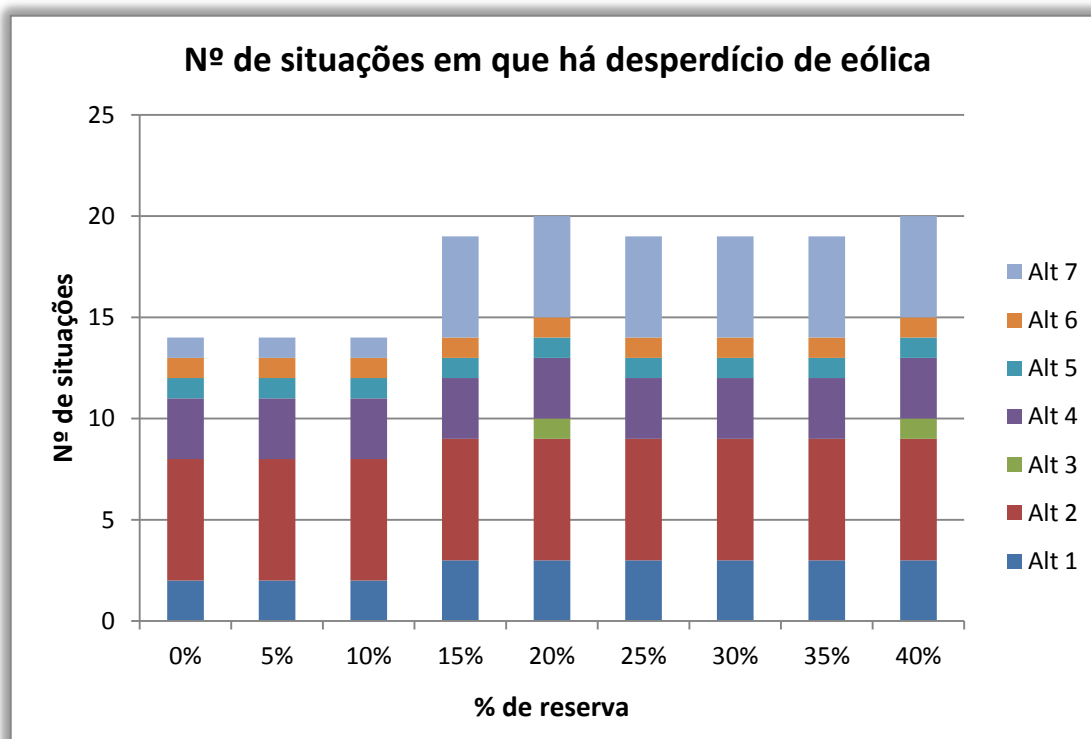


Figura 4.7 - Evolução número de situações em há desperdício de eólica para cada alternativa.

A evolução do número de situações em que há corte de carga com o nível de reserva é apresentada no gráfico da Figura 4.8, onde é possível verificar que o número de situações em que há corte de carga diminui com o aumento da reserva, assim o número de situações em que há carga é inversamente proporcional ao aumento da reserva.

Esta diminuição do número de situações em que há corte de carga à medida que aumenta a reserva, está relacionada com o aumento da robustez do sistema à medida que aumenta reserva, pois se aumenta a margem de produção entre o que cada unidade está a produzir e a sua capacidade máxima de produção, então a diminuição da produção eólica pode, em certos casos, ser compensada pelo aumento de produção das unidades térmicas já escaladas.

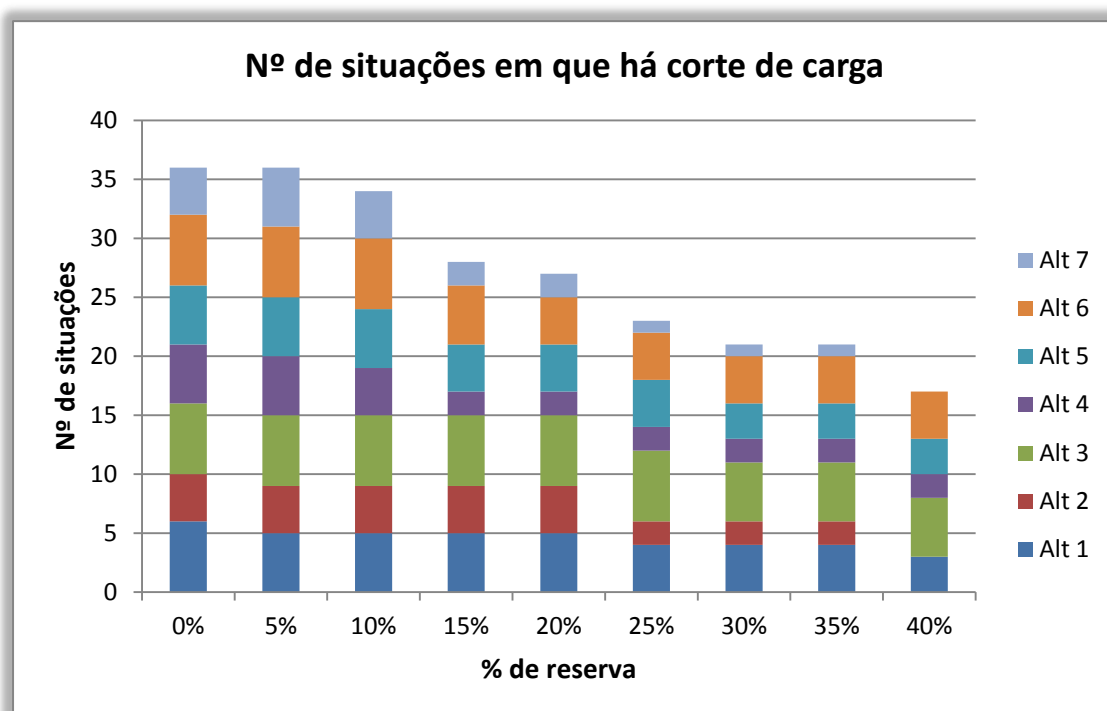


Figura 4.8 - Evolução número de cenários em há corte de carga para cada alternativa.

Para finalizar esta análise, considerando os nove níveis de reserva como mais um parâmetro de decisão para a escolha da melhor alternativa, ficamos com $7 \times 9 = 63$ alternativas de escalonamento⁴, para as quais conhecemos as consequências, ou seja, o corte de carga, o desperdício de produção eólica e o custo de redespacho para cada cenário.

Poderíamos então aplicar a metodologia de decisão já utilizada anteriormente e descrita na secção 3.6, para seleccionar o escalonamento mais robusto de entre todas estas alternativas.

⁴ Algumas podem ser repetidas

Capítulo 5

Conclusões

5.1- Conclusões Gerais

O principal objectivo deste trabalho passou pelo desenvolvimento de um programa de escalonamento e pré-despacho, com recurso à programação dinâmica e com inclusão da volatilidade da produção eólica. A volatilidade da produção eólica foi representada através de vários cenários de produção que levou à consideração de várias alternativas de escalonamento.

A conclusão inicial pode ser retirada do caso de estudo 1, secção 4.1, onde se pode verificar que quanto maior for a produção eólica, menor será o custo do despacho. Isto deve-se à obrigatoriedade em despachar a produção eólica sem considerar qualquer custo associado à sua produção. Assim, quanto maior for a produção eólica, menor será a necessidade de produção por parte das unidades térmicas, o que implica um menor custo de despacho.

Através dos valores obtidos no caso de estudo 1 e 2, secção 4.1 e 4.2, podemos concluir que a incerteza de produção eólica tem influência no escalonamento e pré-despacho das unidades térmicas. Esta influência tem consequências como o corte de carga, desperdício de produção eólica e custos de redespacho. O corte de carga está relacionado com uma diminuição da produção eólica, que obriga ao aumento de produção por parte das unidades térmicas. Por vezes o limite máximo técnico de produção das unidades escaladas é atingido, o que tem como consequência o corte de carga. O desperdício de produção eólica deve-se a um aumento da sua produção. A obrigatoriedade de despacho da produção eólica, obriga à diminuição da produção por parte das unidades térmicas. Quando é atingido o mínimo técnico das unidades escaladas, toda a produção eólica excedente é desperdiçada. À semelhança do que acontece com os custos de despacho, os custos de redespacho são também influenciados pelas variações de produção eólica. Quando há um aumento da produção eólica, o custo de redespacho diminui, e quando diminui a produção eólica, aumenta o custo de redespacho.

Esta conclusão está consequentemente ligada com o corte de carga e desperdício de eólica, ou seja, existe corte de carga devido a uma grande diminuição da produção de eólica, que implica um custo de redespacho maior, e existe desperdício de eólica, devido a um grande aumento da produção eólica, que implica um custo de redespacho menor.

Na secção 4.3, efectuou-se a análise da influência dos níveis de reserva. Em termos gerais podemos concluir que os níveis de reserva influenciam todos estes indicadores de que já falamos, o custo de produção, corte de carga e desperdício de produção eólica. Podemos assim concluir que os custos finais de despacho e os custos de redespacho aumentam com o aumento dos valores da reserva. O corte de carga e o número de situações em que há corte de carga diminui com o aumento da reserva, e o aumento de reserva provoca em grande parte das situações um aumento do desperdício de produção eólica e aumento do número de situações em que há desperdício de produção eólica.

Por fim é de realçar que os objectivos que foram inicialmente propostos para esta dissertação foram atingidos, de tal forma que seria interessante um desenvolvimento do trabalho aqui apresentado, tendo em vista a criação de uma aplicação computacional.

5.2 - Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros o mais importante prende-se com a necessidade de desenvolver um SAD, de modo a ser realmente escolhida melhor alternativa, em vez de apenas mostrar os indicadores e desenvolver estratégias a apresentar ao AD para o próprio decidir qual a melhor alternativa.

O SAD seria baseado em meta-heurísticas com algoritmos evolucionários que se inspira na analogia com a evolução biológica das espécies, em que se verifica a sobrevivência do mais adaptado, ou seja, fossem sucessivamente testando as várias alternativas tendo em conta a sua performance em vários cenários.

Um algoritmo evolucionário visa em primeiro lugar, encontrar a solução óptima de um problema, qualquer que seja a natureza das suas variáveis. Para isso, constitui-se uma população, ou conjunto de soluções possíveis (indivíduos) para o problema. Cada indivíduo é avaliado por uma função a otimizar e os melhores ficam seleccionados para o que se chama reprodução. Segue-se um procedimento que produz novos indivíduos a partir dos seleccionados, constituindo-se uma nova geração. Os indivíduos da nova geração são, por sua vez, avaliados para eliminar os de pior desempenho e segue-se nova fase de reprodução originando uma geração subsequente. Este processo repete-se geração após geração, e a população deverá, em princípio, ir melhorando, ou seja, ir-se enriquecendo de indivíduos com melhor avaliação, até que um certo critério de paragem fica satisfeito. O melhor indivíduo encontrado no processo é tomado, então, como a solução do problema de optimização em causa [38].

Um processo evolucionário depende da definição de uma função de adaptação que estabelece um ambiente e reflecte uma medida da qualidade de cada alternativa (ou solução), também designada como indivíduo. Esta função de adaptação (*fitness function*) tem o mesmo papel que a função objectivo dos problemas de optimização, como tal, para além da valorização das soluções, ela pode incluir penalidades por violação de restrições [38].

Outro trabalho importante seria dotar o programa desenvolvido de uma interface gráfica com o utilizador, *Graphical User Interface* (GUI). Esta interface gráfica teria como principal vantagem a simplificação de um modo geral para todos os utilizadores do programa. Esta simplificação passa por se poder seleccionar os casos de estudo e interpretar os dados obtidos sem ser necessário recorrer ao código que requer uma familiarização com inicial com o programa.

Referências

- [1] Centro de Informação da REN. Disponível em <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT>. Último acesso em Junho de 2010.
- [2] Manuel António Matos, "Introdução ao problema de escalonamento e pré-despacho", Apontamentos para a disciplina de OSEN, FEUP, 2007.
- [3] Ana Maria Marques de Moura Gomes Viana, "Metaheuristics for the Unit Commitment Problem", Dissertação de doutoramento, FEUP, 2004.
- [4] A.J. Wood e B.F. Wollenberg, "Power Generation, Operation and Control", John Wiley & Sons, 1996.
- [5] J.J. Grainger e W.D. Stevenson, "Power Systems Analysis", McGraw-Hill, 1994.
- [6] Ray D. Zimmerman, "Matpower 4.0b2 User's Manual", Power Systems Engineering Research Center, Março de 2004.
- [7] B.F. Hobbs, M.H. Rothkopf, R.P. O'Neill, e H. Chao, "The Next Generation of Electric Power Unit Commitment Models", Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [8] J. L. Silva, "Pré-despacho optimizado em sistemas produtores hidrotérmicos com elevada componente hídrica", Dissertação de doutoramento, FEUP, 1985.
- [9] J. Grainger, W. Stevenson, "Power Systems Analysis", McGraw-Hill, 1994.
- [10] José Pedro Sucena Paiva, "Redes de energia eléctrica, uma análise sistémica", IST Press, 2ª Edição, Dezembro de 2007.
- [11] Decreto-Lei n.º 189/88 de 27 de Maio. Disponível em http://www.igf.min-financas.pt/inflegal/bd_igf/bd_legis_geral/Leg_geral_docs/DL_189_88.htm. Último acesso em Junho de 2010.

- [12] G.B.Sheble e G.N.Fahd, "Unit commitment literature synopsis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 128-135, 1994.
- [13] Sayeed Salam. "Unit Commitment Solution Methods". World Academy of Science, Engineering and Technology 35 2007. Disponível em <http://www.waset.org/journals/waset/v35/v35-59.pdf>. Último acesso em Junho de 2010.
- [14] R. H. Kerr, J. L. Scheidt, A. J. Fontana e J. K. Wiley, "Unit commitment", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 85, no. 5, pp. 417-421, 1966.
- [15] S. K. Tong, S. M. Shahidehpour e Z. Ouyang, "A heuristic short-term unit commitment", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 1210-1216, 1991.
- [16] F. Zhuang e F. D. Galiana, "Unit Commitment by Simulated Annealing," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 311-317, 1990.
- [17] S. A. Kazarlis, A. G. Bakirtzis e V. Petridis, "A genetic algorithm solution to the unit commitment problem," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 83-90, 1996.
- [18] A. Viana, J. P. de Sousa e M. Matos, "A new metaheuristic approach to the unit commitment problem", 14th Power Systems Computation. Disponível em http://www.psc-central.org/uploads/tx_ethpublications/s05p05.pdf. Último acesso em Junho de 2010.
- [19] W. L. Snyder, H. D. Powell, e J. C. Rayburn, "Dynamic programming approach to unit commitment", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 339-351, 1987.
- [20] P. G. Lowery, "Generating unit commitment by dynamic programming", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 85, no. 5, pp. 422- 426, 1966.
- [21] A. K. Ayoub e A. D. Patton, "Optimal thermal generating unit commitment", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 90, no. 4, pp. 1752-1756, 1971.
- [22] C. K. Pang e H. C. Chen, "Optimal short term thermal unit commitment", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 95, no. 4, pp. 1336-1346, 1976.
- [23] C. K. Pang, G. B. Sheble e F. Albuyeh, "Evaluation of dynamic programming based methods and multiple area representation for thermal unit commitment", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 3, pp. 1212-1218, 1981.

- [24] W. J. Hobbs, G. Hermon, S. Warner e G. B. Sheble, "An enhanced dynamic programming approach for unit commitment", *IEEE Trans. On Power Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 1201-1205, 1988.
- [25] S. S. Kumar e V. Palanisamy, "A dynamic programming based fast computation Hopfield neural network for unit commitment and economic dispatch", *Electric Power Systems Research*, vol. 77, no. 8, Junho de 2007. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V30-4KXDR6H-2/2/8616538f9c554673aa7d7339c8403514>. Último acesso em Junho de 2010.
- [26] S. Makridakis, S. C. Wheelwright, e R. J. Hyndman, *Forecasting methods and applications*. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [27] Bart C. Ummels, Madeleine Gibescu, Engbert Pelgrum, Wil L. Kling e Arno J. Brand, "Impacts of Wind Power on Thermal Generation Unit Commitment and Dispatch" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 1, Março de 2007
- [28] Jianhui Wang, Audun Botterud, Vladimiro Miranda, Cláudio Monteiro e Gerald Sheble "Impacts of Wind Power Forecasting on Unit Commitment and Dispatch", 2009. Disponível em <http://www.dis.anl.gov/pubs/65610.pdf>. Último acesso em Junho de 2010.
- [29] A. Tuohy, P. Meibom, E. Denny e M. O'Malley, "Unit Commitment for Systems With Significant Wind Penetration, *IEEE Transactions on Power Systems*, Maio de 2009.
- [30] A. Tuohy, E. Denny e M. O'Malley, "Rolling Unit Commitment for Systems with Significant Installed Wind Capacity" *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, Julho de 2007.
- [31] A. Tuohy, P. Meibom e M. O. Malley, "Benefits of stochastic scheduling for power systems with significant installed wind power," *IEEE PMAPS*, Maio 2008.
- [32] Wind Power Integration in Liberalised Electricity Markets (WILMAR). Projecto disponível em <http://www.wilmar.risoe.dk>. Último acesso em Junho de 2010.
- [33] F. Bouffard e F. Galiana, "Stochastic security for operations planning with significant wind power generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 306-316, 2008.
- [34] J. Wang, M. Shahidehpour e Z. Li, "Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 3, Aug. 2008.
- [35] V.S. Pappala, I. Erlich e S.N. Singh. "Unit Commitment under Wind Power and Demand Uncertainties," *Power System Technology and IEEE Power India Conference*. Outubro de 2008.

- [36] "MatLab 7 - Getting Started guide", The MathWorks, 2007. Disponível em http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf. Último acesso em Junho de 2010.
- [37] S.A. Kazarlis, A.G. Bakirtzis, e V. Petridis. "A Genetic Algorithm solution to the unit commitment problem". IEEE Transactions on Power Systems, 11:83-92, 1996.
- [38] Vladimiro Miranda, "Computação evolucionária: uma introdução", Apontamentos para a disciplina de DOIC, FEUP, Março de 2005.

Anexos

Tabela A.1 – Escalonamento para o caso de estudo 2, reserva de 10% para a carga e 15% para a produção eólica.

[illegible]

4	G_1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	G_4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
	G_5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	G_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
	G_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
5	G_1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	G_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
	G_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	G_6	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
	G_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	G_1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	G_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
	G_5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	G_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
	G_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	G_1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
	G_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	G_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	G_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
	G_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Tabela A.2 – Escalonamento para o caso de estudo 2, reserva de 10% para a carga e 30% para a produção eólica.

Alt	Período																									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
1	G_1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	G_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
	G_5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	G_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
	G_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	G_1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	G_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	G_5	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	G_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	G_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
3	G_1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	G_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	G_5	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	G_6	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
	G_7	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	G_1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
	G_4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	G_5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
	G_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	G_7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

