

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Optimização do escalonamento em sistemas com
elevada produção eólica**

Filipe Martins da Cunha

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 2011

© Filipe Cunha, 2011

Resumo

A crescente integração da energia eólica nos sistemas eléctricos de energia tem conduzido a enormes desafios ao nível da sua operação. As principais dificuldades dessa integração derivam da variabilidade da energia na sua forma primária, o que conduz a uma incerteza considerável na previsão da potência eólica disponível em determinado momento. Esta situação condiciona o escalonamento das máquinas térmicas, podendo originar situações de falta de capacidade ou de desperdício de eólica, para as quais é preciso encontrar soluções que minimizem o seu impacto no sistema energético em questão.

Esta dissertação procura apresentar uma metodologia de optimização baseada numa metaheurística que favorece a melhor solução de escalonamento, considerando previsões probabilísticas de potência eólica representadas sob a forma de cenários.

Com o objectivo de avaliar o impacto que a integração da energia eólica tem no planeamento operacional dos sistemas eléctricos de energia foram testados e analisados diversos indicadores que definem soluções distintas de escalonamento das máquinas térmicas.

Palavras-chave

Operação dos sistemas de energia, Escalonamento, Energia eólica, Previsão de energia eólica, Integração da energia eólica, *Simulated annealing*.

Abstract

The increased integration of wind power in power systems has brought great challenges in terms of its operation. The main difficulties stem from the variability of this integration of energy in its primary form, which leads to considerable uncertainty in predicting the wind power available in a particular time. Those situations affect the commitment of thermal machines, which can lead to situations of lack of capacity or waste of wind power, for which we must find solutions that minimize their impact on the energy system in question.

This dissertation presents an optimization methodology based on metaheuristic, that recommends the best solution for unit commitment, considering probabilistic forecasts of wind power represented in the form of scenarios.

In order to assess the impact that the integration of wind energy has on the operational planning of power systems were tested and analyzed several indicators that define distinct solutions for the unit commitment problem of thermal machines.

Keywords

Power systems operations, Unit commitment, Wind energy, Wind energy forecast, Integration of wind energy, Simulated Annealing.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos os que me apoiaram e tornaram possível a realização desta dissertação.

Ao Professor Doutor Manuel António Cerqueira da Costa Matos, por toda a sua disponibilidade, apoio e conselhos concedidos para a realização do trabalho.

À Filipa, pela compreensão, motivação e apoio em todo o percurso académico.

Aos meus pais Fátima e Carlos, pela oportunidade, esforço e suporte prestado ao longo de toda a minha vida.

À minha família pelo apoio e motivação que sempre demonstraram.

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

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

Índice

Resumo	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 e Motivação.....	2
1.2 - Objectivos.....	5
1.3 - Ferramentas de Trabalho.....	5
1.4 - Estrutura da dissertação.....	5
Capítulo 2	7
Escalonamento e Pré-despacho com produção eólica.....	7
2.1 - Identificação do problema	8
2.2 - Custos e restrições do problema	9
2.3 - A energia eólica	13
2.3.1- Previsão e incerteza	13
2.3.2- Influência da incerteza no problema de escalonamento e pré-despacho.....	16
2.4 - Soluções	16
2.4.1- Notação utilizada	17
2.4.2- Solução de escalonamento	17
2.4.3- Cenários de produção eólica e potência de carga	18
2.5 - Abordagens ao problema	18
2.6 - O Processo de optimização.....	21
Capítulo 3	25
Metodologia.....	25
3.1 - Indicadores de avaliação	26
3.1.1- Corte de carga.....	26
3.1.2- Desperdício de eólica	27

3.1.3- Custo de operação	29
3.2 - Parâmetros de implementação	30
3.2.1- Temperatura Inicial - T_0	31
3.2.2- Esquema de arrefecimento	31
3.2.3- Número de iterações à mesma temperatura - Ln	32
3.2.4- Probabilidade de aceitação - $p(n)$	32
3.2.5- Critério de paragem	32
3.2.6- Solução Inicial	33
3.2.7- Esquema de vizinhanças	33
3.3 - Funções de avaliação.....	33
3.3.1- Modelo 1	34
3.3.2- Modelo 2	35
3.4 - Implementação do processo	37
Capítulo 4	39
Apresentação e Análise de Resultados	39
4.1 - Dados de entrada	40
4.1.1- Características dos geradores	40
4.1.2- Diagrama de cargas.....	40
4.1.3- Cenários de produção eólica.....	41
4.1.4- Condições Iniciais	42
4.2 - Ensaios realizados.....	42
4.2.1- Modelo 1	43
4.2.2- Modelo 2	47
4.2.3- Ensaios complementares	50
Capítulo 5	55
Conclusões	55
5.1 - Conclusões gerais	56
5.2 - Trabalhos Futuros	56
Referências	59
Anexos	61

Lista de figuras

Figura 1.1 - Tendência da produção energética em Portugal [1]	2
Figura 1.2 - Diagrama de Cargas da RNT (19.05.2011) [1].....	3
Figura 1.3 - Características do diagrama de cargas anual em Portugal [1].....	4
Figura 1.4 - Diagrama de produção eólica (19.05.2011) [1].....	4
Figura 2.1 - Sequência de obtenção de soluções	9
Figura 2.2 - Representação do modelo de barramento único	9
Figura 2.3 - Função custo de funcionamento	10
Figura 2.4 - Custos de arranque de centrais com turbina a vapor	11
Figura 2.5 - Evolução anual da capacidade eólica em Portugal [4]	13
Figura 2.6 - Exemplo de previsão de potência eólica [6]	14
Figura 2.7 - Representação exemplo de cenários estocásticos de previsão eólica.....	15
Figura 2.8 - Períodos, estados e trajectórias [2]	19
Figura 2.9 - Fluxograma de procedimentos do método <i>Simulated Annealing</i>	22
Figura 3.1 - Algoritmo de despacho económico [16]	29
Figura 3.2 - Esquema de arrefecimento geométrico	31
Figura 3.3 - Ilustração exemplo do problema.....	34
Figura 3.4 - Níveis hierárquicos para a primeira hipótese	35
Figura 3.5 - Níveis hierárquicos para a segunda hipótese	36
Figura 3.6 - Algoritmo genérico do método <i>Simulated Annealing</i>	37
Figura 4.1 - Diagrama de cargas	41
Figura 4.2 - Representação gráfica dos cenários de produção eólica	42
Figura 4.3 - Representação dos custos de operação.....	46

Figura 4.4 - Representação do corte de carga.....	46
Figura 4.5 - Representação do desperdício de eólica	46
Figura 4.6 - Representação dos custos de operação.....	49
Figura 4.7 - Representação do corte de carga.....	50
Figura 4.8 - Representação do desperdício de eólica	50
Figura 4.9 - Comparação de indicadores	51
Figura 4.10 - Comparação da função objectivo	52
Figura 4.11 - Comparação da função objectivo	53

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Índices de Corte de carga	26
Tabela 3.2 - Índices de Desperdício de eólica	28
Tabela 4.1 - Grupos Produtores	40
Tabela 4.2 - Carga em cada período	40
Tabela 4.3 - Cenários de produção eólica (MW)	41
Tabela 4.4 - Condições iniciais	42
Tabela 4.5 - <i>Trade-offs</i> para os ensaios I e II	43
Tabela 4.6 - Resultados do ensaio I	43
Tabela 4.7 - Índices do ensaio I	43
Tabela 4.8 - Resultados do ensaio II	44
Tabela 4.9 - Índices do ensaio II	44
Tabela 4.10 - <i>Trade-offs</i> para os ensaios III e IV	44
Tabela 4.11 - Resultados do ensaio III	45
Tabela 4.12 - Índices do ensaio III	45
Tabela 4.13 - Resultados do ensaio IV	45
Tabela 4.14 - Índices do ensaio IV	45
Tabela 4.15 - Resultados do ensaio V	47
Tabela 4.16 - Índices do ensaio V	47
Tabela 4.17 - Resultados do ensaio VI	48
Tabela 4.18 - Índices do ensaio VI	48
Tabela 4.19 - Resultados do ensaio VII	48

Tabela 4.20 - Índices do ensaio VII	48
Tabela 4.21 - Resultados do ensaio VIII	49
Tabela 4.22 - Índices do ensaio VIII	49
Tabela 4.23 - Resultados do ensaio XIX.....	51
Tabela 4.24 - Índices do ensaio XIX.....	51
Tabela 4.25 - Resultados do ensaio XX.....	52
Tabela 4.26 - Índices do ensaio XX	52
Tabela A.1 - Soluções iniciais de escalonamento	61
Tabela A.2 - Solução de escalonamento para o ensaio I.....	61
Tabela A.3 - Solução de escalonamento para o ensaio II	62
Tabela A.4 - Solução de escalonamento para o ensaio III	62
Tabela A.5 - Solução de escalonamento para o ensaio IV	62
Tabela A.6 - Solução de escalonamento para o ensaio V	63
Tabela A.7 - Solução de escalonamento para o ensaio VI	63
Tabela A.8 - Solução de escalonamento para o ensaio VII	63
Tabela A.9 - Solução de escalonamento para o ensaio VIII.....	64
Tabela A.10 - Solução de escalonamento para o ensaio XIX	64
Tabela A.11 - Solução de escalonamento para o ensaio XX	64

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

SA	<i>Simulated Annealing</i>
P	Potência activa
Pmin	Potência mínima
Pmax	Potência máxima
REN	Redes Energéticas Nacionais
RNT	Rede Nacional de Transporte
SEE	Sistema de Energia Eléctrica
UC	<i>Unit Commitment</i>

Lista de símbolos

α	Valorização do corte de carga
β	Valorização do desperdício de eólica
\$	Custo
\$/h	Custo por hora
W	Watt
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
▪	Fim do registo de ensaio

Capítulo 1

Introdução

No panorama energético actual é cada vez maior a necessidade de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis por razões de carácter económico e ambientais. Neste contexto, a energia eólica tem vindo a revelar-se uma forte alternativa para a produção de electricidade, derivado do facto de não apresenta custos directos de produção, nem produzir qualquer tipo de emissões prejudiciais à atmosfera e meio ambiente.

No entanto, a forma primária da energia eólica é um recurso que admite grande variabilidade ao longo do tempo, pelo que não é possível prever com exactidão a potência total disponível em determinado momento. Esta situação condiciona a produção nas máquinas térmicas que, atendendo à sua capacidade e margem de reserva, devem assegurar potência suficiente para compensar as variações provenientes da energia eólica.

O presente trabalho propõe um método de optimização do escalonamento de um conjunto de geradores térmicos, baseado na metaheurística *Simulated Annealing* com o qual se pretende encontrar uma solução que minimize a influência da integração de potência proveniente da energia eólica.

A tese aqui apresentada foi desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, major em Energia e especialização em Redes, leccionado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

1.1 - Enquadramento e Motivação

Nas últimas décadas, a energia eléctrica assumiu importância vital no funcionamento de qualquer economia. Desde o simples consumidor doméstico às grandes indústrias a electricidade é usada e valorizada como um bem essencial, sendo o grande desafio das redes eléctricas assegurar a qualidade e continuidade do abastecimento de todos os consumidores.

Nos últimos anos tem-se assistido a uma forte aposta nos recursos energéticos de carácter renovável por parte de governos e investidores privados. A nível internacional foram estabelecidos protocolos com objectivos de redução de emissões de gases poluentes para a atmosfera provenientes, em parte, da produção de electricidade a partir de combustíveis fósseis e, nesse sentido, é crescente a integração de formas de produção de energia limpa a partir de fontes renováveis.

A União Europeia tem como objectivo a redução dos gases de efeito de estufa na Europa em cerca de 20% até 2020 e Portugal, como estado membro, está comprometido com esse mesmo objectivo.

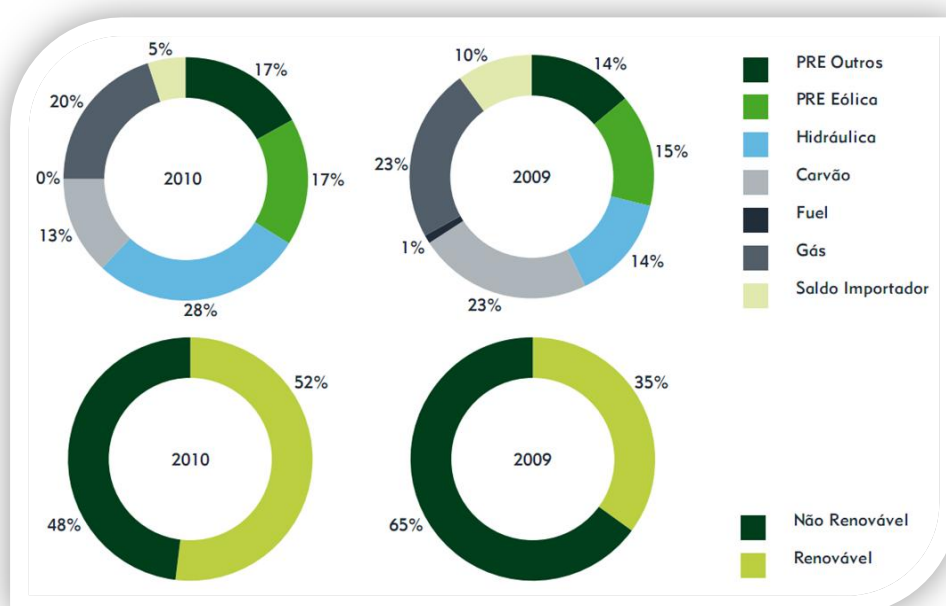


Figura 1.1 - Tendência da produção energética em Portugal [1]

Atendendo à operação de um sistema eléctrico de energia básico, compreendem-se dois pontos fundamentais: a produção e o consumo de energia.

Estes pontos, assim como a sua conjugação, devem ser previstos e planeados minuciosamente de forma a minimizar todos os custos operacionais, respeitando as diversas restrições existentes. Neste contexto, a integração de fontes renováveis na produção de energia com os grupos convencionais já existentes, principalmente com as centrais térmicas cuja influência se pretende diminuir, deve ser feita de forma ponderada, respeitando todos

os limites operacionais tanto dos próprios geradores, como de todos os elementos constituintes do sistema eléctrico em questão.

Por outro lado, a energia proveniente de fonte renovável é um recurso de disponibilidade muito variável, devido à sua fonte primária depender dos agentes atmosféricos no momento.

A previsão da quantidade de potência disponível em determinado instante é feita com base nos dados meteorológicos disponíveis, o que condiciona a tomada de decisão por parte do operador do sistema no momento de conciliação com os restantes focos de produção.

Como o princípio base da operação do sistema de energia passa por ajustar o plano de produção ao consumo previsto para um determinado intervalo de tempo, é necessário conhecer previamente o diagrama de cargas que se pretende alimentar.

Os consumos energéticos estão associados à actividade socioeconómica, sendo por isso variáveis ao longo do tempo, com horas de maior e de menor procura. Nesse sentido, é usual serem representados por períodos horários estabelecidos diariamente. Os valores de potência consumida em cada hora são determinados a partir de elementos estatísticos dados pelo consumo real no mesmo dia de anos anteriores e considerando a evolução de consumos prevista para o ano corrente.

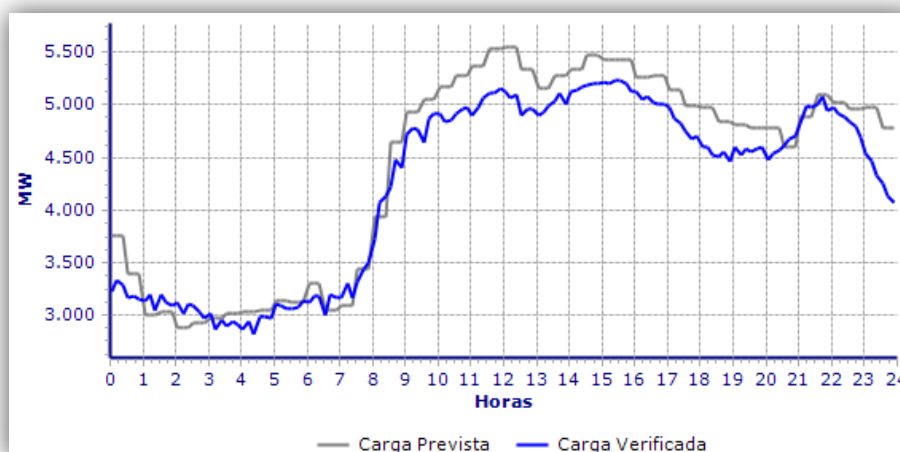


Figura 1.2 - Diagrama de Cargas da RNT (19.05.2011) [1]

Posteriormente é necessário avaliar os recursos disponíveis para a produção. O diagrama é preenchido em primeira instância pelos grupos de Produção em Regime Especial, dos quais fazem parte as turbinas eólicas. As máquinas de arranque lento, i. e., cuja resposta a pedidos de potência não imediata, compõem o patamar seguinte do diagrama. São geradores que partem de um processo de combustão de determinada substância de forma a elevar a temperatura do vapor de água que acciona a turbina, daí o seu atraso na resposta à procura.

Os picos de potência do diagrama são preenchidos por energia proveniente de recursos hídricos, cuja resposta é praticamente instantânea no contexto do problema. Caso a disponibilidade dos recursos hídricos não seja suficiente para assegurar a procura, procede-se

à importação de energia de sistemas vizinhos, embora seja uma medida de recurso pelos encargos financeiros que acarreta. Estas tomadas de decisão são da responsabilidade do operador do sistema e são efectuadas nos centros de despacho.

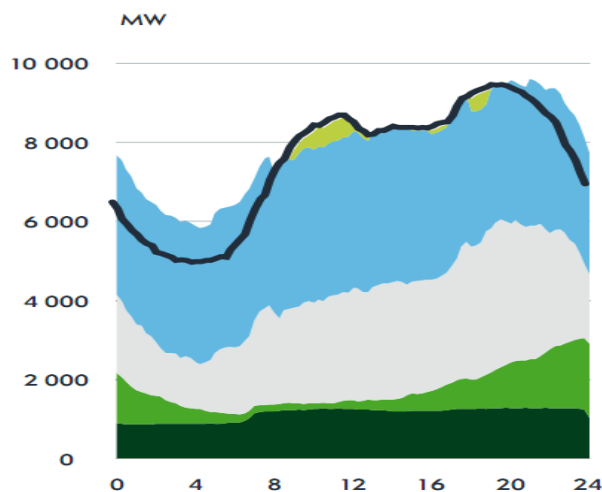


Figura 1.3 - Características do diagrama de cargas anual em Portugal [1]

Atendendo ao objectivo deste trabalho, conjugar potência eólica com potência produzida a partir de soluções de escalonamento de máquinas térmicas convencionais, é também importante conhecer a disponibilidade do recurso renovável no contexto do problema.

De forma análoga ao diagrama de cargas, o diagrama de produção eólica é estabelecido para o mesmo período de 24 horas, correspondente a determinado dia. Trata-se de uma previsão com base na informação meteorológica disponível e na potência total das turbinas eólicas operacionais nesse mesmo período.



Figura 1.4 - Diagrama de produção eólica (19.05.2011) [1]

O vento é um recurso com extrema variabilidade, o que proporciona uma elevada incerteza em torno da previsão de potência eólica ao longo do tempo. A sua integração num sistema com produção térmica condiciona o escalonamento deste tipo de máquinas uma vez que é necessário garantir por um lado a resposta ao diagrama de cargas, caso haja uma potência eólica inferior à que inicialmente foi prevista, por outro lado, as máquinas térmicas quando ligadas possuem valores mínimos de produção, existindo a possibilidade de se estabelecer uma situação com excesso de produção face ao valor da carga procurada, levando ao desperdício de energia eólica. Estes conceitos implicam uma gestão efectiva da capacidade das máquinas térmicas escaladas de forma a reduzir o efeito da incerteza associada à produção eólica.

1.2 - Objectivos

Este trabalho tem a pretensão de apresentar uma metodologia de optimização tendo em vista encontrar soluções de escalonamento de um dado sistema eléctrico de energia com integração de potência eólica.

As soluções encontradas devem atender ao princípio da minimização dos custos de operação, base de todos os problemas de escalonamento, e devem também assegurar uma capacidade total que seja capaz de minimizar o efeito da integração de potência eólica variável no sistema.

Para tal, foi criada uma aplicação informática de cálculo automatizado em função dos parâmetros da metodologia que proporciona uma solução final para o escalonamento das máquinas térmicas do sistema em estudo.

1.3 - Ferramentas de Trabalho

O desenvolvimento da aplicação descrita nesta dissertação foi realizado com recurso à linguagem de programação Visual Basic.

Todos os dados e resultados obtidos foram compilados e analisados através do *software* Excel disponível no Microsoft Office.

1.4 - Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos.

No primeiro, é contextualizada a temática do trabalho no panorama actual, a motivação que levou à realização deste estudo e os principais objectivos que se pretendem atingir.

No segundo, são identificados os conceitos que envolvem o modelo do problema de escalonamento e pré-despacho com inclusão de produção eólica. A obtenção de soluções de

escalonamento segue um princípio de optimização de acordo com diversos tipos de metodologias, abordadas neste capítulo, com especial destaque para o processo de optimização utilizado neste trabalho.

No terceiro, é descrita a metodologia utilizada. A incerteza que está associada à potência eólica permite estabelecer indicadores que caracterizam a solução de escalonamento. Esses indicadores são incorporados em funções de avaliação que por sua vez seleccionam as soluções pretendidas. Os parâmetros de implementação do algoritmo de optimização são também definidos neste capítulo.

No quarto, é apresentado o sistema de energia para o qual se pretende encontrar soluções de escalonamento que se ajustem ao panorama previsto de potência eólica. De acordo com as funções de avaliação estabelecidas são determinadas soluções e avaliadas em função do seu impacto no sistema.

No quinto e último capítulo, são apresentadas as conclusões que se podem extrair do trabalho realizado e introduzidas as referências para eventuais trabalhos futuros.

Capítulo 2

Escalonamento e Pré-despacho com produção eólica

Neste capítulo são abordados os problemas do escalonamento e pré-despacho de máquinas térmicas, com a inclusão de potência proveniente de recursos eólicos e da incerteza que está associada à sua previsão.

As restrições operacionais e os custos associados ao processo de produção de energia eléctrica são factores que se pretendem contornar e minimizar.

No entanto, a constante evolução dos sistemas de energia, a par com a evolução dos recursos computacionais de optimização permitem estabelecer modelos cada vez mais robustos na procura da solução óptima de escalonamento.

Por outro lado, a actual necessidade de integrar recursos renováveis traz novos desafios a esta problemática, incrementando o número de restrições e condicionantes devido a variabilidade associada à energia na sua forma primária.

Todos estes factores são abordados neste capítulo, com especial relevo para os elementos ponderados no desenvolvimento deste trabalho.

2.1 - Identificação do problema

O problema de escalonamento¹ e pré-despacho, em traços gerais, é um problema de optimização, cuja solução (máquinas térmicas escaladas) deve assegurar capacidade suficiente para alimentar a carga no intervalo considerado com uma certa margem de reserva, respeitando as diversas restrições operacionais e proporcionando o menor custo de operação possível (influenciado pelo pré-despacho). É definido usando intervalos horários para um determinado horizonte temporal, dependendo do tipo de restrições existentes [2] e a função objectivo do problema que se pretende minimizar é dada por

$$C = \sum_{i=1}^t (C_i + T_i) = \sum_{i=1}^t \left(\sum_{j=1}^n \left[u_{ij} \cdot \left(C_j^V(P_{ij}) + C_j^A \cdot (1 - u_{i-1,j}) \right) + (1 - u_{ij}) \cdot (u_{i-1,j}) \cdot C_j^P \right] \right) \quad (2.1)$$

na qual C_i e T_i representam os custos totais de funcionamento e transição em cada período i , respectivamente. $C_j^V(P_{ij})$ indica o custo variável associado ao combustível utilizado pelo grupo j para produzir a potência P_{ij} no período i e C_j^A e C_j^P são respectivamente os custos de arranque e paragem da máquina j . u_{ij} é uma variável binária e representa o estado da máquina j no período i (1 para a máquina ligada e 0 para a máquina desligada). Devido aos custos de transição é necessário definir previamente o estado inicial do problema $i=0$, isto é, todos os u_{0j} , não sendo incluídos os custos variáveis respectivos.

A potência eólica é incluída no modelo do problema através das previsões efectuadas. O valor previsto para a potência eólica disponível em determinado período é compensado directamente na potência de carga e o escalonamento das máquinas térmicas é realizado em função desse novo valor, podendo-se afirmar que a potência eólica funciona como uma carga negativa.

Até aqui nada de novo é adicionado ao problema de escalonamento e pré-despacho clássico. A incerteza associada à variabilidade do vento vem proporcionar o grande desafio ao processo de optimização.

Partindo do princípio que não é possível mobilizar geradores suplentes, torna-se necessário garantir que as máquinas térmicas escaladas possuam capacidade máxima suficiente para compensar um valor de potência eólica inferior ao previsto, evitando situações de corte de carga. Por outro lado, as máquinas térmicas uma vez ligadas possuem valores mínimos de produção que, conciliado com uma potência eólica superior à prevista poderá originar situações em que haja excedente de potência, levando ao desperdício de energia eólica. A solução óptima é aquela que não apresente qualquer corte de carga, não proporcione excessos de produção face ao consumo e minimize os encargos económicos de operação.

¹ Também denominado de *Unit Commitment* na literatura internacional.

O escalonamento e pré-despacho, embora sendo dois problemas distintos, são obtidos com uma resolução sistemática dos dois.

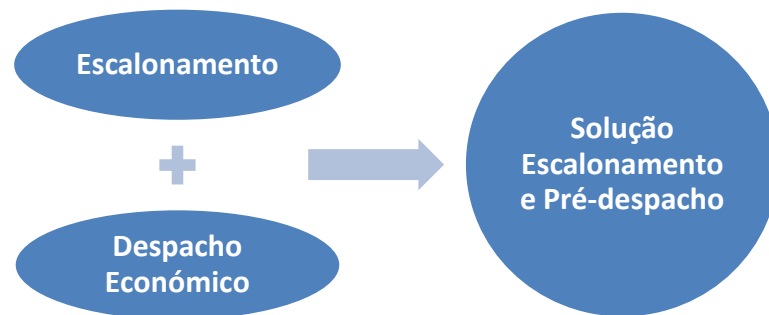


Figura 2.1 - Sequência de obtenção de soluções

Importa ainda mencionar que o escalonamento e pré-despacho realizado neste trabalho é representado pelo modelo de barramento único exibido na figura 2.2, i. e., não foi considerada a rede de transporte e respectivas perdas. Toda a potência gerada é absorvida directamente pela carga.

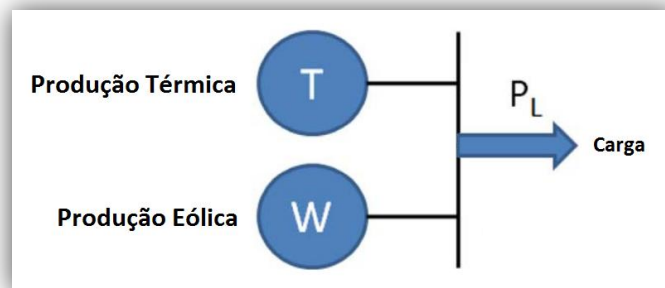


Figura 2.2 - Representação do modelo de barramento único

2.2 - Custos e restrições do problema

Os custos associados à operação das máquinas térmicas convencionais variam de máquina para máquina. São determinados a partir das suas características físicas e de funcionamento, dependendo do tipo de combustível que cada uma delas utiliza.

Evidenciam-se os custos de produção nas máquinas térmicas, cujas definições e imagens apresentadas foram extraídas do documento [2]:

- **Custo de funcionamento** - valor atribuído à operação directa da máquina térmica. É determinado com base no custo do combustível utilizado para a produção de energia, que se caracteriza por ser tipicamente não linear. Nesta função custo está incluído o estado de paragem da máquina, representado pelo

ponto (0,0), como ilustra a figura 2.3 que, obviamente, não acarreta qualquer custo de produção.

Realçam-se também os limites (mínimo e máximo) de produção da máquina térmica, que serão devidamente referidos mais à frente nesta secção.

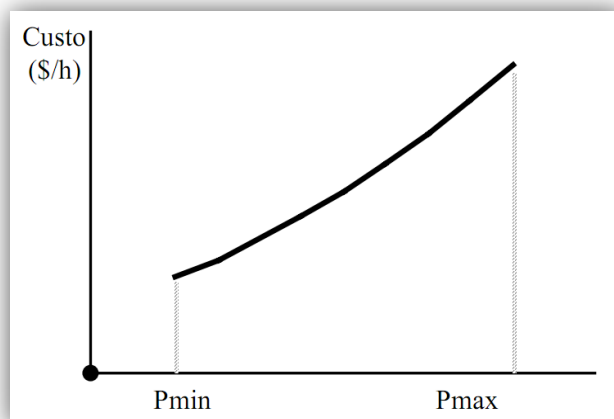


Figura 2.3 - Função custo de funcionamento

- **Custo de arranque** - valor atribuído ao arranque da máquina térmica. É independente do valor de potência a produzir e está relacionado com o tempo de paragem anterior, no caso das turbinas a vapor. Este custo está relacionado com o arrefecimento das caldeiras durante o período de paragem da máquina e pode ser definido através de dois tipos de expressões, dependendo do tipo de arranque.

Considerando o arranque da máquina partindo do princípio que se encontrava desligada por um considerável período de tempo - *cooling* - a função custo de arranque é dada por

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

na qual C_A é o custo fixo de arranque, independentemente do estado inicial da máquina, e a segunda parcela tende exponencialmente para C_F , que é o custo de arranque a frio, dependendo do tempo de paragem da máquina e respectivo corte de combustível.

Considerando agora que a máquina arranca com as caldeiras ainda quentes - *banking* - a função custo deriva do custo fixo de arranque e do custo horário associado ao consumo de combustível (C_T) para manter a temperatura necessária ao arranque

$$C(t) = C_A + C_T \cdot t \quad (2.3)$$

Na figura 2.4 é possível comparar os dois tipos de arranque, verificando-se facilmente que a utilização do arranque com a turbina mantida quente só compensa para paragens curtas, de algumas horas. A partir do ponto de equilíbrio entre as duas funções passa a compensar o arranque da máquina a frio.

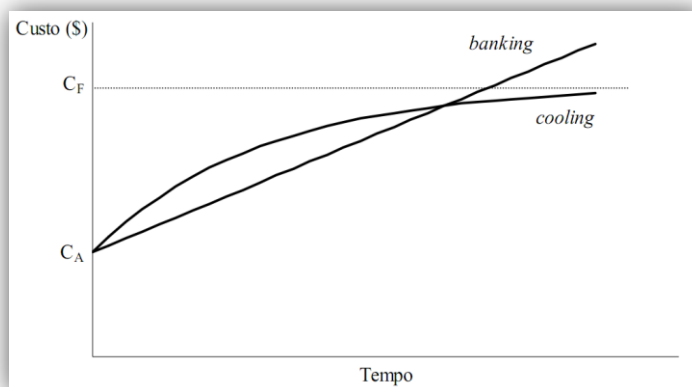


Figura 2.4 - Custos de arranque de centrais com turbina a vapor

No caso dos grupos de produção a diesel, a função custo de arranque depende de um maior número de factores, como a inclusão de patamares intermédios de aquecimento, mudanças de combustível, etc., sendo usual estabelecer o custo de arranque a partir de um modelo simplificado, próprio da máquina e da situação em questão.

- **Custo de Paragem** - quando se modeliza o custo de arranque de forma simplificada (em alternativa às formulações atrás indicadas), os custos associados a manter condições para um arranque a quente (*banking*) são modelizados como custos de paragem. Custos de paragem que também podem ter que ser considerados em certos grupos diesel.

Ao nível das restrições à potência gerada para as máquinas térmicas, para além do princípio genérico de alimentação total da carga proposta, a capacidade total das máquinas escaladas deverá ser sempre superior ao valor da carga em todos os períodos considerados. Esse valor deverá ainda compreender a margem de reserva girante imposta ao sistema, determinada para cada período de acordo com os seguintes pressupostos:

- 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 geradores térmicos, devido às suas características de funcionamento, sofrem de um atraso na resposta a variações imprevistas no consumo, ou seja, não é possível ligar

determinado grupo de forma a produzir instantaneamente a potência que se pretende, como também não se verifica a situação contrária, i. e., não é possível reduzir de forma imediata determinado valor de potência caso haja uma redução da carga. Por outro lado, existem motivos técnicos e económicos que inviabilizam o funcionamento deste tipo de geradores em curtos períodos de tempo. Por estas razões, apresentam-se de seguida e de forma abreviada um conjunto de restrições à produção de energia nos grupos térmicos:

- **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** - os valores máximo e mínimo da potência produzida pelo grupo são 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). Os valores típicos da potência mínima para grupos com turbina a vapor são 40 a 70% da sua potência máxima. Estes limites também se utilizam no despacho.
- **Taxas máximas de tomada e deslastre de carga** - não sendo possível 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).

Os aspectos focados, nomeadamente a questão dos tempos de arranque, mostram que o pré-despacho tem uma escala temporal totalmente diferente da do despacho, possuindo, além disso, muito maior incerteza na definição das cargas e maior complexidade na formulação matemática, dada a presença de variáveis inteiras (grupo ligado ou desligado em cada período) e de funções custo não convexas.

Neste trabalho todos os custos mencionados foram incluídos no modelo do problema. Relativamente ao conjunto de restrições, apenas foram considerados os limites de produção dos grupos térmicos.

2.3 - A energia eólica

A produção de energia proveniente do vento tem sido o recurso renovável com maior investimento e expansão em Portugal, realidade acompanhada por todos os países industrializados.

Segundo os dados da Global Wind Energy Council [4], Portugal apresenta actualmente uma taxa de crescimento da potência instalada de 9%, sendo notória a evolução anual da capacidade na última década, como se comprova no gráfico da figura 2.5.

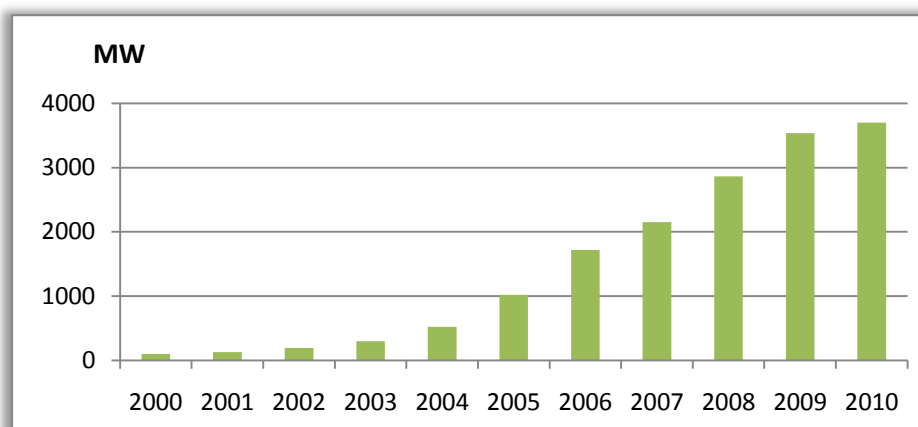


Figura 2.5 - Evolução anual da capacidade eólica em Portugal [4]

As vantagens deste recurso são evidentes, pois não apresenta quaisquer custos directos de produção nem emite gases de efeito de estufa para atmosfera. Os inconvenientes do recurso a este tipo de energia passam pela perturbação estética e ambiental do local de implantação e eventualmente pelo ruído que se faz sentir nas proximidades das turbinas.

No entanto, a energia eólica é um recurso caracterizado pela extrema variabilidade do vento, o que condiciona a previsão da capacidade disponível em determinado instante. A melhoria dos modelos de previsão e a atenuação do impacto que as variações de potência eólica podem ter nos sistemas eléctricos de energia são actualmente os grandes desafios ao nível da operação.

2.3.1 - Previsão e incerteza

O vento é uma corrente de ar direccionada, provocada pela diferença de pressão entre várias camadas ou zonas de atmosfera e, como tal, depende de diversos factores

meteorológicos para se formar e assumir a intensidade desejada para accionar as turbinas eólicas. Trata-se de um recurso passível de previsão, como outros elementos meteorológicos, e a necessidade de prever a sua velocidade em determinado instante prende-se com o facto de diminuir a dependência face ao acaso.

No problema de escalonamento e pré-despacho a previsão da potência eólica permite definir soluções que melhor se adaptem à capacidade que é esperada, eliminando custos dispensáveis de uma solução genérica para uma capacidade eólica totalmente desconhecida.

A energia eólica difere da produção convencional nos seguintes aspectos [5]: 1) A capacidade instalada de produção eólica raramente pode ser aproveitada na totalidade, contrariamente aos grupos térmicos convencionais; 2) a energia eólica não é previsível com elevada precisão, até 24-36 horas antes da disponibilidade efectiva, como acontece com a previsão da potência de carga. Prever atempadamente a potência eólica serve diferentes propósitos à operação do sistema:

- Previsão de **longo prazo** permite definir o plano de capacidades de produção;
- Previsão de **médio prazo** é necessária à gestão e manutenção do plano atribuído ao sistema estabelecido em longo prazo;
- Previsão de **curto prazo** é necessária para estabelecer de forma eficaz o plano de operação.

Constantemente associada à previsão está a incerteza que envolve determinado valor de potência inicialmente prevista.

A incerteza é uma consequência directa da extrema variabilidade do vento e tal como acontece em todo o tipo de previsões, principalmente nas que estão associadas a fenómenos meteorológicos, o erro que relaciona os resultados previstos com a sua incerteza aumenta quando o prazo de previsão é alargado. Esse erro fica mais evidente com uma breve análise à figura 2.6.

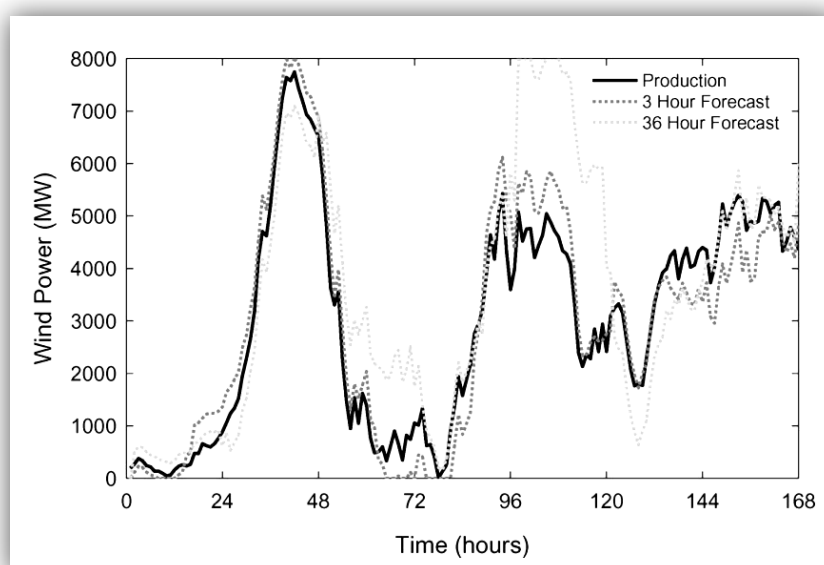


Figura 2.6 - Exemplo de previsão de potência eólica [6]

A representação da incerteza na produção eólica e a sua integração nos sistemas tem sido motivo de vários estudos que visam avaliar e minimizar o seu impacto. Por exemplo, Matos e Bessa [7] avaliaram a margem de reserva operacional de um sistema considerando dois tipos de incerteza na potência eólica. A primeira diz respeito à impossibilidade de antever com exactidão energia eólica disponível e foi quantificada através de um modelo probabilístico de previsão. A segunda fonte de incerteza está relacionada com a eventual possibilidade de turbinas eólicas ficarem fora de serviço, embora o impacto desta incerteza seja diminuto em sistemas de grande dimensão. Em [8], a incerteza na potência eólica foi modelizada com lógica difusa, através de uma função de previsão da velocidade do vento, e incluída posteriormente no modelo de escalonamento, enquanto que em [9] o problema foi abordado utilizando cenários estocásticos de previsão.

A constituição de previsões sobre a forma de cenários parte das distribuições de incerteza da energia eólica, constituindo uma representação estocástica de valores de potência. Os cenários de produção eólica são estabelecidos com base na distribuição bidimensional discreta de probabilidades associada a cada transição entre intervalos de tempo sucessivos. Cada cenário tem uma probabilidade de ocorrência que deriva do produto de probabilidades ao longo das transições entre os períodos e é relativa ao total de cenários que são constituídos [9]. Na figura 2.7 é apresentado um exemplo com vários cenários de produção eólica, na qual fica mais perceptível a evolução de cada um.

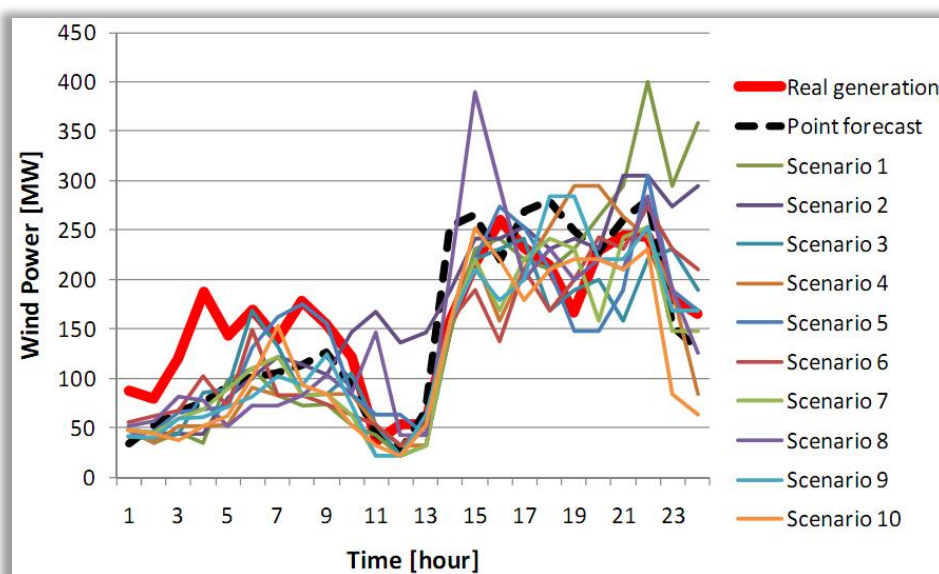


Figura 2.7 - Representação exemplo de cenários estocásticos de previsão eólica

No trabalho aqui apresentado, este foi o modelo de previsão de potência eólica implementado no processo de optimização, a partir do qual se obteve soluções de escalonamento.

2.3.2 - Influência da incerteza no problema de escalonamento e pré-despacho

Como já foi referido anteriormente, a integração de energia proveniente de recursos eólicos introduz novos desafios à operação dos sistemas já existentes. Contrariamente à produção de energia convencional (quer seja por recurso a processos térmicos, quer por recursos hídricos, etc.) a energia eólica apresenta uma variabilidade que impossibilita a eficaz predefinição da capacidade total disponível no sistema. Apesar dos métodos de previsão existentes, advém sempre uma margem de incerteza que deve ser contornada e cujo impacto no sistema em questão se pretende minimizar.

Quando se verifica um valor de potência eólica superior ao previsto e as máquinas térmicas escaladas se encontram a operar nos seus valores mínimos de produção, pode gerar-se uma situação em que existe excesso de produção se não houver escoamento de potência para eventuais alternativas (bombagem em centrais hídricas, exportação para outros sistemas, etc.). Este panorama ganha maior probabilidade de ocorrência nas horas de vazio porque para além de existir uma menor procura, também é o período horário com maior incidência de vento e assim aumenta o nível da capacidade eólica disponível.

Por outro lado, um valor de potência eólica inferior ao previsto e com as máquinas térmicas escaladas a operar nos limites máximos de produção pode originar uma situação contrária à anterior, na qual existe um défice de potência face ao valor exigido pela carga (partindo do princípio que não existem grupos suplentes de arranque rápido ou acesso à importação de outras redes). A opção viável para assegurar a integridade e os parâmetros regulares de operação do sistema de energia passa por recorrer ao deslastre de parte da carga, assumindo as consequências e encargos dessa situação.

Neste sentido, a variabilidade da produção eólica assume-se como uma condição essencial na programação da produção de energia no sistema, que relaciona directamente a regulação da reserva girante. É este conceito que deve ser alvo de investigação e desenvolvimento face ao constante crescimento da capacidade instalada de produção eólica, de forma a atenuar os efeitos derivados da inconstância do vento e garantindo a fiabilidade do sistema paralelamente ao menor custo de operação.

2.4 - Soluções

De seguida, é apresentada a formulação que constitui uma solução genérica de escalonamento, no contexto do problema.

2.4.1 - Notação utilizada

Para melhor percepção das fórmulas utilizadas, apresenta-se de seguida uma compilação de todos os termos utilizados nas próximas expressões:

- p_i^L - Potência de carga no período i (MW);
- p_{ij} - Potência produzida no período i , pelo gerador j (MW);
- p_{ik}^W - Potência eólica prevista para o período i , no cenário k (MW);
- p_j^{max} - Potência máxima do gerador j (MW);
- p_j^{min} - Potência mínima do gerador j (MW);
- Cap_i^{max} - Capacidade máxima da solução para o período i (MW);
- Cap_i^{min} - Capacidade mínima da solução para o período i (MW);
- n - Número de geradores do sistema;
- t - Número de períodos;
- c - Número de cenários de produção eólica.

2.4.2 - Solução de escalonamento

Para um sistema composto por n máquinas térmicas a escalar num dado conjunto de t períodos de um dado diagrama de cargas, uma solução possível de escalonamento é composta por uma matriz binária U , dada pela expressão

$$U = [u_{ij}] \quad (2.4)$$

com $i = 1, 2, \dots, t$ períodos e $j = 1, 2, \dots, n$ máquinas e na qual u_{ij} é uma variável binária que define o estado da máquina j no período i (0 - máquina desligada, 1 - máquina ligada).

Atendendo às características operacionais das máquinas envolvidas, cada gerador ligado tem uma gama de valores que limita a sua produção

$$p_j^{min} \leq p_{ij} \leq p_j^{max} \quad (2.5)$$

Então, cada solução de escalonamento apresenta capacidades máxima e mínima de produção em cada período, dadas pelas expressões 2.6 e 2.7, respectivamente.

$$Cap_i^{max} = \sum_{j=1}^n u_{ij} \cdot p_j^{max} \quad (2.6)$$

$$Cap_i^{min} = \sum_{j=1}^n u_{ij} \cdot p_j^{min} \quad (2.7)$$

2.4.3- Cenários de produção eólica e potência de carga

A previsão de potência eólica disponível é quantificada em vários cenários de produção, de acordo com as máquinas disponíveis nos parques e baseado em previsões meteorológicas. Assim, para os mesmos períodos de escalonamento das máquinas térmicas é estabelecido um conjunto de cenários de produção eólica, com igual probabilidade de ocorrência em cada período, dada pela matriz

$$P^W = [p^w_{ik}] \quad (2.8)$$

com $i = 1, 2, \dots, t$ períodos, $k = 1, 2, \dots, c$ cenários de produção eólica e onde cada elemento é expresso em MW.

Cada cenário tem igual probabilidade de ocorrência no sistema.

De forma análoga, a potência prevista para o consumo dada pelo diagrama de cargas pode ser representada vectorialmente, onde para cada período i corresponde um valor de potência de carga

$$P^L = [p^L_i] \quad (2.9)$$

Admite-se que a carga se mantém constante em cada período.

A conjugação de uma solução de escalonamento com a potência de carga e com a potência eólica prevista em cada cenário permite avaliar e quantificar a falta ou o excesso de produção, caso existam, através da construção de dois indicadores: Corte de Carga e Desperdício de Eólica. Estes indicadores de potência serão devidamente formulados no capítulo 3 deste trabalho, concomitantemente com o processo de optimização utilizado.

2.5 - Abordagens ao problema

Tal como já tinha sido referido, o problema de escalonamento consiste no processo de decisão que selecciona as máquinas térmicas que serão ligadas/desligadas em determinado período, tendo em conta os custos de produção de cada máquina, as restrições operacionais e a carga que se propõe alimentar, e a sua solução pode ser determinada a partir de vários algoritmos e técnicas de optimização.

As primeiras abordagens do problema de escalonamento foram realizadas com base em heurísticas de **ordem de mérito**. Com esta metodologia pretendia-se definir a ordem de entrada em serviço dos grupos escalados, obtida pela determinação de um indicador de relação do custo médio à potência máxima. As restrições operacionais são incluídas heurísticamente e a eficácia do método depende da afinação desse indicador. A grande

vantagem manifesta-se na simplicidade de resolução. No entanto, é um modelo que não relaciona directamente a formulação matemática do problema com todas as restrições conjugadas directamente, pelo que se considera uma metodologia pouco precisa na obtenção de uma solução óptima global [10].

A **programação dinâmica** é outra forma de abordar o problema de escalonamento. Permite reduzir substancialmente o espaço de pesquisa pois evita repetições de cálculos que a listagem de todas as soluções possíveis e viáveis implicaria.

Cada solução de escalonamento viável para um determinado período é denominada de estado. Cada estado é caracterizado por um conjunto de máquinas ligadas e desligadas e o pré-despacho de potência atribuído às máquinas ligadas define o custo de produção desse estado.

O processo de obtenção da solução de escalonamento para um conjunto de períodos tem que listar todos os estados viáveis em cada período para, posteriormente, aplicar uma fórmula de recorrência que indicará a melhor trajectória para a escala das máquinas. O princípio de optimização está implícito na fórmula de recorrência, que relaciona também os custos de transição entre estados de períodos distintos.

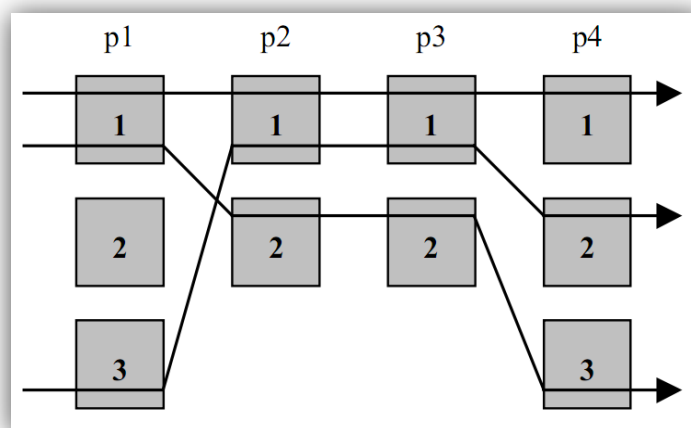


Figura 2.8 - Períodos, estados e trajectórias [2]

A desvantagem desta metodologia prende-se com a dimensão do problema. Em sistemas de dimensão real, o número de estados possíveis em cada período e o número de combinações possíveis entre períodos é significativamente grande, o que proporciona um tempo de execução para a obtenção da solução óptima inabarcável.

Existem adaptações do modelo de programação dinâmica que permitem reduzir esse tempo de execução, por exemplo, estabelecendo um limite para o número de sub-trajectórias entre estados e seleccionando um determinado número que apresente o menor

custo, é possível reduzir o espaço de soluções do problema. No entanto, não fica garantida a obtenção da solução ótima.

Outra abordagem comum à resolução do problema é denominada de **Relaxação Lagrangeana**. Esta metodologia consiste no princípio de ignorar temporariamente as restrições do problema, tornando-o dissociável em relação aos grupos de produção. A relação entre cada sub-problema é dada pelos multiplicadores de Lagrange, que são adicionados ao problema principal. Neste sentido, o processo de optimização passa pela resolução de um problema dual [12] que impõe iterativamente restrições a cada sub-problema até todas as restrições estarem garantidas, situação na qual é apresentado o resultado ótimo pretendido. A dificuldade deste método consiste em definir o intervalo dual para cada iteração, de forma a garantir a convergência do processo.

Mais recentemente, têm sido alvo de pesquisa e desenvolvimento abordagens baseadas em **metaheurísticas** e **algoritmos genéticos** [15] para a resolução de problemas de escalonamento. Em [13], Viana, Sousa e Matos abordaram o problema do escalonamento com base na metaheurística Simulated Annealing. Em consequência das limitações que a representação binária de soluções pode originar quando aplicada em processos de optimização, no trabalho referido foi testado um novo esquema de codificação das soluções. A par dessa representação, foram também implementadas novas estruturas de geração de vizinhos e estratégias de pesquisa orientadas para a redução dos custos de transição das máquinas envolvidas. Os resultados obtidos foram promissores, demonstrando flexibilidade e eficácia na adaptação do processo a novas situações.

Ainda na área das metaheurísticas, os mesmos autores apresentam em [14] uma abordagem ao problema baseada em Greedy Randomized Adaptive Search Procedure, através da qual estabelecem uma evolução da pesquisa de soluções melhoradas partindo das decisões tomadas nas iterações anteriores. Nos ensaios efectuados através deste método foram encontradas boas soluções de escalonamento para os sistemas em estudo quando comparadas com soluções obtidas através de outras abordagens, o que permitiu concluir que se trata de uma abordagem robusta e eficaz ao problema de escalonamento.

Este tipo de ferramentas permite manipular e incluir novas restrições ao modelo do problema, beneficiando de particular interesse ao nível da adaptação a casos concretos. Torna-se mais fácil implementar variantes do problema e definir diferentes funções objectivo, usando este tipo de metodologias.

No entanto, o grande desafio passa por assegurar a obtenção da solução ótima global do problema, o que poderá considerar-se uma tarefa complicada ou mesmo impossível em problemas complexos devido à existência de múltiplos mínimos locais.

Considerando agora a inclusão de potência eólica no problema de escalonamento, Meirinhos [11] desenvolveu uma aplicação baseada em programação dinâmica, para solucionar o problema. A abordagem forward (pesquisa para a frente) permitiu encontrar soluções óptimas de escalonamento de um sistema com dimensões académicas em cada um dos cenários de produção eólica previstos. Posteriormente analisou os indicadores corte de carga, desperdício de eólica e custo de redespacho de cada solução, quando cruzada com os restantes cenários e, perante os critérios do agente de decisão, seleccionou a solução de escalonamento que melhor se adaptava ao conjunto de previsões de forma a minimizar o impacto operacional e económico.

A técnica utilizada é uma boa ferramenta de optimização para potências constantes de produção eólica e sistemas de dimensões triviais e ilustrativas. Sistemas maiores elevam o número de soluções aceitáveis para o problema pelo que, o tempo de computação aumentaria consideravelmente. Por outro lado, a solução que é óptima para determinado cenário de produção eólica, deixa de o ser com a ocorrência de um cenário diferente.

A solução de escalonamento realmente óptima, que minimiza o impacto operacional no sistema a par dos custos de operação independentemente do cenário que vier a ocorrer, poderá até ser diferente das que foram obtidas e obriga a formulação de outro processo de optimização para ser encontrada.

Neste trabalho, a solução para o problema de escalonamento com integração eólica foi determinada a partir de um processo de optimização baseado na metaheurística *Simulated Annealing*².

2.6 - O Processo de optimização

A metaheurística *Simulated Annealing* baseia-se numa analogia entre o processo de procura da solução óptima num determinado problema combinatório e o processo físico de arrefecimento e cristalização dos sólidos [17].

Quando uma dada matéria que se encontra no estado sólido é aquecida até determinado ponto, todas as partículas que a constituem podem circular livremente passando a ficar dispostas de forma aleatória.

O processo de arrefecimento - *annealing* - decorre de forma controlada, o que permite orientar a energia das partículas e reorganizá-las numa nova estrutura. Cada iteração representa um patamar de temperatura e de energia mínima, no qual a nova estrutura é encontrada quando o momento de equilíbrio térmico é atingido.

² Também usualmente designada de Arrefecimento Simulado, na literatura nacional.

O controlo do arrefecimento é o factor chave do sucesso da reorganização das partículas. Se for efectuado de forma muito rápida, o sólido não atinge o estado de equilíbrio térmico e a reorganização das partículas poderá não se estabelecer da forma pretendida, solidificando defeituosamente e tornando a estrutura irregular, em vez do estado cristalino de mínima energia que se pretende obter.

O equilíbrio térmico para cada valor de temperatura, considerado no processo de arrefecimento, caracteriza-se pela probabilidade de o sólido se encontrar num estado de energia E determinada a partir da distribuição de Boltzmann. Com o decorrer do processo de arrefecimento, à medida que a temperatura desce a distribuição de Boltzmann centra-se nos estados de energia mais baixa, limitando a probabilidade de aceitação e assim sucessivamente até o processo atingir determinado critério de paragem que delinea o estado final de organização das partículas.

A adaptação deste método ao problema de escalonamento baseia-se numa sequência de procedimentos, de acordo com o fluxograma da figura 2.9.

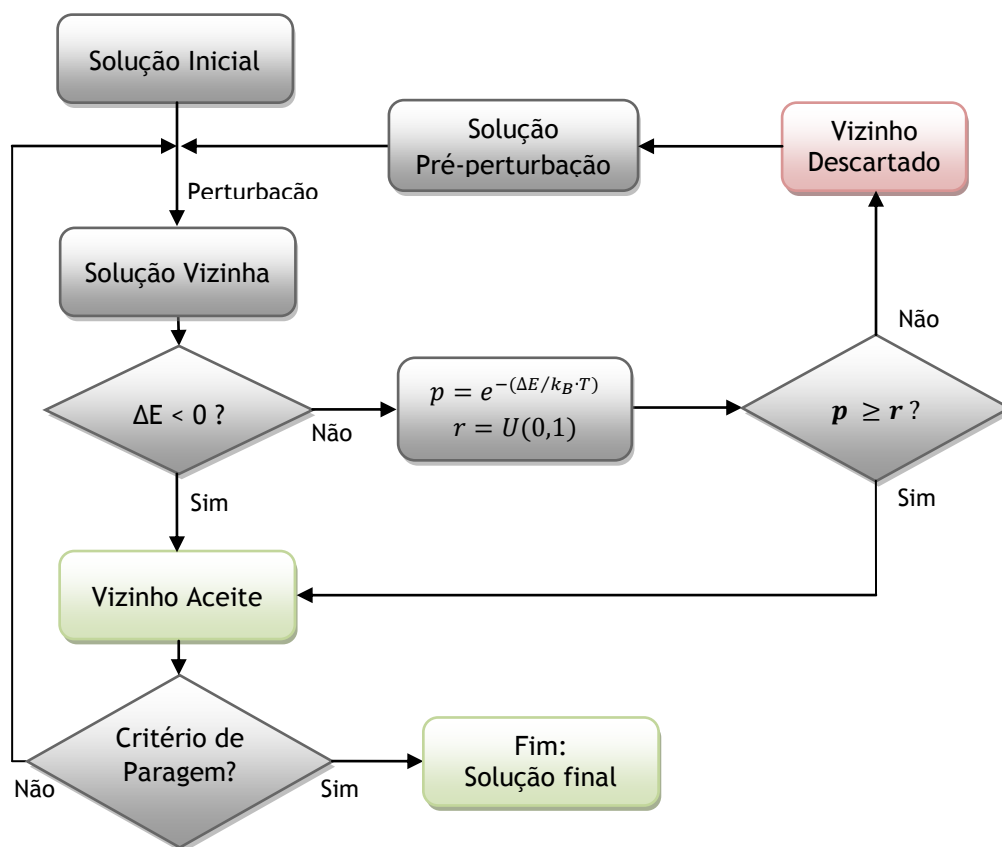


Figura 2.9 - Fluxograma de procedimentos do método *Simulated Annealing*

Dado o estado corrente de uma qualquer solução inicial de escalonamento do conjunto de máquinas de um sistema, é aplicada uma perturbação a essa solução (alteração de um bit escolhido aleatoriamente, por exemplo); a função objectivo do problema, na qual se

pretende a minimização dos custos operacionais, é adaptada ao processo de optimização através de uma função de avaliação entre duas soluções possíveis e viáveis de escalonamento; para cada solução, a função de avaliação determina a energia E correspondente e de seguida avalia a diferença da energia ΔE entre a solução inicial e a nova solução ligeiramente perturbada:

- Se ΔE for negativa, significa que a perturbação originou um estado de energia inferior à solução anterior, então a perturbação é aceite, passa a estado corrente e o procedimento prossegue.
- Se ΔE for superior ou igual a 0 é avaliada a probabilidade de aceitação do novo vizinho, isto é, a probabilidade dada por $p = e^{-(\Delta E/k_B \cdot T)}$ é comparada com um número r , aleatório e distribuído uniformemente entre 0 e 1. O novo vizinho é aceite quando $p \geq r$. Caso não se verifique esta condição, então o vizinho é descartado, mantendo-se a solução que antecede a última perturbação e a sequência prossegue.

Este último ponto do processo permite a procura de estados com valores de energia mais baixos, sem se limitar a pesquisa a eventuais mínimos locais da função de avaliação. O processo de arrefecimento termina uma vez atingido determinado critério de paragem (temperatura mínima, por exemplo).

No próximo capítulo são definidos os parâmetros necessários à implantação do SA no problema de optimização do escalonamento.

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo são descritos os vários elementos que coordenam o processo de optimização utilizado no desenvolvimento do trabalho.

A construção de indicadores que caracterizam e distinguem soluções de escalonamento permite estabelecer diversas funções de avaliação, com o intuito de apresentar um método de optimização transversal adaptado aos critérios de opcionalidade do operador de sistema e que ofereça soluções de escalonamento das máquinas térmicas que tendencialmente minimizem os custos operacionais, o corte de carga e o desperdício de eólica, eventualmente causados pela integração de potência eólica no sistema.

A implementação da metaheurística *Simulated Annealing* segue um conjunto de procedimentos e definição de parâmetros devidamente identificados e analisados neste capítulo.

O recurso renovável integrado no sistema é apresentado sob a forma de cenários já estabelecidos em estudos anteriores e recuperados para este trabalho. O diagrama de cargas para o qual se pretende encontrar uma solução robusta de escalonamento e pré-despacho também é conhecido previamente e adoptado para este trabalho.

Não faz parte dos objectivos desta dissertação estabelecer previsões de consumos e de potência eólica disponível em determinado instante.

3.1 - Indicadores de avaliação

O acto de seleccionar o conjunto de máquinas térmicas que vão estar ligadas/desligadas em determinado período tem implicações operacionais, quando afectadas por uma produção variável originada a partir de energia eólica, que podem ser representadas através de formulações matemáticas, para posteriormente serem aplicadas no algoritmo de optimização.

Neste trabalho são utilizados três critérios de avaliação de uma solução: o corte de carga, o desperdício de eólica e o custo de operação.

3.1.1 - Corte de carga

Dado um determinado cenário é possível determinar a folga entre a capacidade máxima das máquinas escaladas e a carga compensada pela potência eólica em cada um dos períodos, através da expressão

$$\Delta P_{ik}^{CC} = p_i^L - Cap_i^{max} - p_{ik}^W \quad (3.1)$$

Assim, a folga determinada ΔP_{ik}^{CC} permite definir duas condições que avaliam e quantificam o corte de carga da solução:

- Se $\Delta P_{ik}^{CC} \geq 0$ não se verifica corte de carga no período i , pelo que assume o valor 0;
- Se $\Delta P_{ik}^{CC} < 0$ verifica-se corte de carga nesse período com o valor $|\Delta P_{ik}^{CC}|$.

Cruzando a solução de escalonamento com todos os cenários de produção eólica, é possível determinar o valor de ΔP_{ik}^{CC} para cada um deles e em todos os períodos do diagrama de cargas, com ΔP_{ik}^{CC} expresso em MW.

Tabela 3.1 - Índices de Corte de carga

		Cenários de Produção Eólica					
		1	2	...	k	...	c
Períodos	1	ΔP_{11}^{CC}	ΔP_{12}^{CC}	...	ΔP_{1k}^{CC}	...	ΔP_{1c}^{CC}
	2	ΔP_{21}^{CC}	ΔP_{22}^{CC}	...	ΔP_{2k}^{CC}	...	ΔP_{2c}^{CC}
	...	...	...	...	...	...	...
	i	ΔP_{i1}^{CC}	ΔP_{i2}^{CC}	...	ΔP_{ik}^{CC}	...	ΔP_{ic}^{CC}
	...	...	...	...	...	...	...
	t	ΔP_{t1}^{CC}	ΔP_{t2}^{CC}	...	ΔP_{tk}^{CC}	...	ΔP_{tc}^{CC}
Total		ΔP_1^{CC}	ΔP_2^{CC}	...	ΔP_k^{CC}	...	ΔP_c^{CC}

Os totais para cada cenário permitem listar o impacto ao nível de corte de carga que a ocorrência de determinado cenário de produção eólica terá na solução de escalonamento das máquinas térmicas considerada.

A robustez da solução pode ainda ser avaliada por indicadores agregados que simplificam o processo de comparação entre soluções:

- Valor esperado - média aritmética dos totais de corte de carga em cada cenário, uma vez que as probabilidades de ocorrência são iguais

$$E^{CC} = E(|\Delta P^{CC}_k|) = \frac{\sum_{k=1}^c |\Delta P^{CC}_k|}{c} \quad (3.2)$$

Este indicador agregado permite optar por uma solução que melhor se adapte ao conjunto dos cenários de produção eólica, minimizando o corte de carga de forma global, independentemente do cenário que, de facto, se irá confirmar.

- Valor máximo - valor máximo dos totais de corte de carga em cada cenário

$$M^{CC} = \max_k(|\Delta P^{CC}_k|) \quad (3.3)$$

Este indicador agregado permite identificar o valor máximo do corte de carga que a escolha de determinada solução de escalonamento poderá ter no conjunto dos cenários.

A escolha indicadores agregados permite avaliar determinada solução ao nível do corte de carga ou do desperdício de eólica (a determinar no próximo ponto) considerando apenas um único valor. No momento de implementação do processo de optimização, a função de avaliação recupera esse valor de forma a orientar a pesquisa de soluções de escalonamento que o tendam a minimizar.

A escolha destes dois indicadores agregados, em particular, permite diferenciar soluções à primeira vista semelhantes no processo de comparação mas que possuem características distintas em cada cenário. Por exemplo, uma solução que apresente um valor muito elevado de corte de carga em determinado cenário e nulo nos restantes pode traduzir-se num valor médio aceitável no processo de comparação. No entanto, com o segundo indicador agregado no qual se destaca o valor máximo de corte de carga, essa mesma solução já seria devidamente avaliada.

3.1.2 - Desperdício de eólica

Para contabilizar o desperdício de eólica, parte-se do princípio que a capacidade mínima das máquinas escaladas em determinado período é inferior ao valor da carga

$$Cap^{min}_i < p^L_i \quad (3.4)$$

Se essa condição não fosse verificada, poderia haver soluções com excesso de produção mesmo sem incluir potência eólica e uma solução de escalonamento com essa característica não é considerada viável, pelo que nem chega a ser avaliada no processo de otimização.

Assim e forma análoga ao Corte de carga, dado um determinado cenário é também possível determinar a folga entre a capacidade mínima das máquinas escaladas e a carga compensada pela potência eólica em cada um dos períodos.

$$\Delta P^{DE}_{ik} = Cap^{min}_i + p^W_{ik} - p^L_i \quad (3.5)$$

Assim, a folga determinada ΔP^{DE}_{ik} permite definir as condições que avaliam e quantificam o desperdício de eólica da solução:

- Se $\Delta P^{DE}_{ik} > 0$ verifica-se a existência de excedente de eólica no período i com o valor de ΔP^{DE}_{ik} ;
- Se $\Delta P^{DE}_{ik} \leq 0$ não se verifica a existência de excedente de eólica nesse período e ΔP^{DE}_{ik} assume o valor 0.

Novamente, cruzando a solução de escalonamento com todos os cenários de produção eólica, é possível determinar o valor de ΔP^{DE}_{ik} para cada um deles, em todos os períodos do diagrama de cargas, com ΔP^{DE}_{ik} expresso em MW.

Tabela 3.2 - Índices de Desperdício de eólica

		Cenários de Produção Eólica					
		1	2	...	k	...	c
Períodos	1	ΔP^{DE}_{11}	ΔP^{DE}_{12}	...	ΔP^{DE}_{1k}	...	ΔP^{DE}_{1c}
	2	ΔP^{DE}_{21}	ΔP^{DE}_{22}	...	ΔP^{DE}_{2k}	...	ΔP^{DE}_{2c}
	...	...	...	...	...	...	...
	i	ΔP^{DE}_{i1}	ΔP^{DE}_{i2}	...	ΔP^{DE}_{ik}	...	ΔP^{DE}_{ic}
	...	...	...	...	...	...	...
	t	ΔP^{DE}_{t1}	ΔP^{DE}_{t2}	...	ΔP^{DE}_{tk}	...	ΔP^{DE}_{tc}
Total		ΔP^{DE}_1	ΔP^{DE}_2	...	ΔP^{DE}_k	...	ΔP^{DE}_c

Os totais para cada cenário permitem listar o impacto ao nível de desperdício de eólica.

Podem agora ser estabelecidos para o desperdício de eólica indicadores correspondentes ao que se definem para o corte de carga:

- Valor esperado - avaliação da solução de escalonamento realizada através da média aritmética dos totais de corte de carga em cada cenário

$$E^{DE} = E(|\Delta P^{DE}_k|) = \sum_{k=1}^c |\Delta P^{DE}_k| / c \quad (3.6)$$

Este indicador agregado permite optar por uma solução que melhor se adapte ao conjunto dos cenários de produção eólica, minimizando o desperdício de eólica de forma global, independentemente do cenário que, de facto, se irá confirmar.

- Valor máximo - avaliação da solução de escalonamento realizada através do valor máximo dos totais de corte de carga em cada cenário

$$M^{DE} = \max_k(|\Delta P_k^{DE}|) \quad (3.7)$$

Este indicador agregado permite identificar o valor máximo do desperdício de eólica que a escolha de determinada solução de escalonamento poderá ter caso ocorra o cenário o maximize.

3.1.3 - Custo de operação

Os custos de operação provêm de duas origens: custo produção dado pelo despacho económico e os custos de transição de estado das máquinas em cada período.

O problema do despacho a atribuir aos geradores ligados em determinada solução foi resolvido através do processo iterativo de manipulação dos custos marginais.

As funções custo dos geradores são funções quadráticas do tipo

$$C(p_j) = A_j + B_j \cdot p_{ij} + C_j \cdot p_{ij}^2 \quad (3.8)$$

na qual A , B e C representam parâmetros fixos dos geradores.

Foi utilizado o seguinte algoritmo para determinar o despacho económico.

- i. Arbitrar um valor inicial de λ ;
 - ii. Iteração k :
 - a) Calcular a produção de cada gerador associada ao valor de λ^k ;
 - b) Se a produção total for superior à carga, então fixar um novo valor de λ tal que $\lambda^{k+1} < \lambda^k$;
 - c) Se a produção total for inferior à carga, então fixar um novo valor de λ tal que $\lambda^{k+1} > \lambda^k$;
 - iii. Repetir até o processo convergir.

Figura 3.1 - Algoritmo de despacho económico [16]

A produção de cada gerador ligado é determinada pela expressão

$$p_j = \frac{\lambda^k - B_j}{2 \cdot C_j} \quad (3.9)$$

O processo converge quando o valor da produção total dos geradores ligados na solução de escalonamento iguala a potência de carga compensada pela produção eólica.

Este algoritmo seria perfeitamente linear se não houvesse restrições de potência nos geradores. Como não é o caso, é necessário implementar algumas compensações:

- i. Em primeiro lugar, deve-se avaliar se a capacidade máxima das máquinas ligadas é suficiente para alimentar a carga compensada pela produção eólica. Se não for, o despacho a atribuir será obviamente o valor máximo que cada gerador consegue produzir e o processo termina;
- ii. Na situação contrária, se a capacidade mínima dos geradores ligados for superior ao valor da carga compensada pela produção eólica, o despacho a atribuir aos geradores será o valor mínimo que conseguem produzir e o processo termina;
- iii. Depois, é necessário verificar se a produção atribuída individualmente a cada gerador está compreendida entre os seus limites de produção. Se não estiver, fixa-se o valor da produção do gerador em causa a partir da iteração na qual se verifica a violação dos limites, quer seja o valor de produção mínimo ou máximo conforme a situação.

Desta forma o despacho é atribuído a cada gerador, apresentando o custo mínimo de produção nas máquinas térmicas.

Os custos de transição das máquinas entre períodos são custos fixos e dependem de cada gerador. São adicionados aos custos de produção em cada período para se obter o custo total de operação que caracteriza determinada solução em cada um dos cenários. De forma equivalente aos indicadores de corte de carga e desperdício de eólica, também os custos de operação podem ser incluídos na função de avaliação através do seu valor esperado e do valor máximo:

- Valor esperado - média aritmética dos custos de operação em cada cenário

$$E^{CO} = E(|CO_k|) = \sum_{k=1}^C CO_k / C \quad (3.10)$$

- Valor máximo - máximo dos custos de operação no conjunto de cenários

$$M^{CO} = \max_k(CO_k) \quad (3.11)$$

3.2 - Parâmetros de implementação

São apresentadas de seguida um conjunto de decisões genéricas, essenciais à implementação do algoritmo *Simulated Annealing*. Estão relacionadas com a temperatura inicial, o esquema de arrefecimento e actualização da temperatura, incluindo o número de iterações a realizar em cada patamar de temperatura, a definição da probabilidade de aceitar soluções piores e o critério final que termina o processo.

3.2.1 - Temperatura Inicial - T_0

A temperatura inicial deve ser suficientemente elevada de forma a libertar o espaço de pesquisa de soluções. No entanto, temperaturas iniciais muito elevadas podem resultar numa perda de eficiência do método: perde-se demasiado tempo num estado muito volátil, o que torna o carácter da pesquisa meramente aleatório e não orientado à solução óptima. O valor de T_0 é usualmente determinado a partir da expressão da probabilidade inicial de aceitar novos vizinhos. A probabilidade é apontada para cerca um valor entre 0.4 e 0.5 de hipóteses de aceitação e a variação de energia parte de uma majoração da função objectivo. É uma técnica usual em investigações anteriores para definir a temperatura inicial [17]. Neste trabalho foi usada a temperatura $T_0 = 4000$.

3.2.2 - Esquema de arrefecimento

Neste trabalho, o decremento de temperatura com a evolução do algoritmo foi realizado a partir de um esquema geométrico [17], no qual a temperatura diminui multiplicada por um factor α compreendido entre 0 e 1

$$T_n = \alpha^n \cdot T_0 \quad (3.12)$$

A robustez do algoritmo é relativamente assegurada para valores de α entre 0.90 e 0.99 e neste trabalho foi utilizado o valor $\alpha = 0,95$.

Na figura 3.2 o esquema de arrefecimento fica mais perceptível. O valor L representado nas abcissas corresponde ao número de iterações em cada patamar de temperatura.

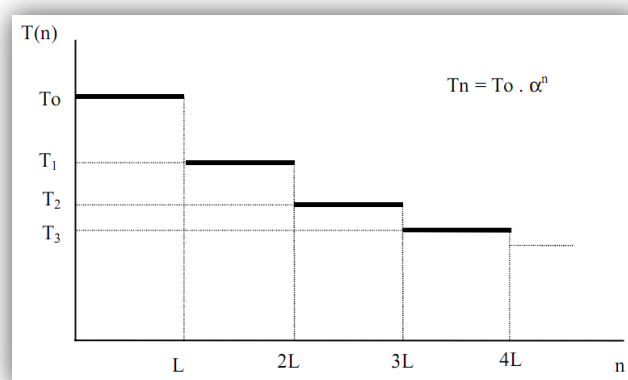


Figura 3.2 - Esquema de arrefecimento geométrico

Existem outros esquemas de arrefecimento, nomeadamente esquemas logarítmicos ou adaptativos ao número de soluções aceites por exemplo, já ensaiados noutros estudos. Contudo o esquema geométrico é o mais usual e robusto para maioria dos problemas de

optimização com recurso a *Simulated Annealing* e atendendo ao teor deste trabalho foi este o esquema de arrefecimento adoptado.

3.2.3 - Número de iterações à mesma temperatura - L_n

O número de iterações realizadas à mesma temperatura T_n depende essencialmente da capacidade de o algoritmo atingir o equilíbrio térmico, ou seja, da capacidade de explorar devidamente o espaço de soluções vizinhas. O valor de L_n é constante em qualquer patamar de temperatura e a sua dimensão depende do problema em concreto. Segundo experiência de outros autores, valores elevados de L_n não apresentam vantagens significativas na obtenção do equilíbrio térmico, apenas diminuem a eficácia do algoritmo, pelo que é usualmente atribuído pelo programador em função da sua experiência com o problema em concreto que pretende solucionar. Neste trabalho foi utilizado o valor $L_n = 50$ para o número de iterações à mesma temperatura.

3.2.4 - Probabilidade de aceitação - $p(n)$

A função probabilidade de aceitação utilizada é a seguinte

$$p(n) = e^{(-\Delta F_n/T_n)} \quad (3.13)$$

onde $\Delta F_n = F_{actual} - F_{vizinho}$ representa a variação da função de avaliação e T_n é a temperatura no patamar actual.

3.2.5 - Critério de paragem

Pela natureza do método não é possível saber quando a solução óptima do problema é encontrada³. Por esta razão, é necessário estabelecer um critério de natureza empírica que evite a redundante e eventualmente inútil pesquisa de soluções melhores face à normal evolução do algoritmo.

Dadas as diversas formas de estabelecer critérios de paragem, destaca-se a paragem do algoritmo após N temperaturas consecutivas sem uma melhoria da função de avaliação de pelo menos y%. Anulando essa percentagem fica definido o critério de paragem do algoritmo para N temperaturas diferentes sem melhoria da função objectivo. Neste trabalho, o critério de paragem é accionado ao fim de dois patamares de temperatura consecutivos, sem melhoria da solução, ou seja $N = 2$.

³ A menos que, à partida, já se conheça a solução óptima e se pretenda testar a robustez do método.

3.2.6 - Solução Inicial

A escolha da solução inicial não segue nenhuma norma específica. No entanto, a experiência revela que, em paralelo com o esquema de geração de vizinhanças, a sua escolha influencia bastante a convergência do método para uma solução melhor. Neste trabalho foram utilizadas duas soluções iniciais: a primeira foi obtida a partir de uma atribuição aleatória de estados às máquinas do sistema, em todos os períodos; a segunda foi recuperada do trabalho realizado pelo Meirinhos [11] com o intuito de comparação de resultados.

3.2.7 - Esquema de vizinhanças

O esquema de perturbações a aplicar a determinada solução, de forma a gerar vizinhos deve ser capaz de conduzir a pesquisa para a solução óptima ou para um valor mínimo que se aproxime do óptimo global. Um bom vizinho deve ter valores próximos da solução que o antecede ao nível da função de avaliação, mas ao mesmo tempo deve ser capaz de seguir a orientação desejada para a solução óptima. Estas imposições assumem um carácter teórico que, na prática é complicado garantir.

Neste trabalho considera-se como vizinho uma solução de escalonamento que, no mesmo período escolhido aleatoriamente, altere dois bits distintos à configuração anterior determinados também de forma aleatória.

3.3 - Funções de avaliação

A metodologia aqui apresentada foi desenvolvida com o intuito de proporcionar uma solução final de escalonamento que se caracterize pela robustez e que minimize os custos de operação, o corte de carga e o desperdício de eólica, independentemente do cenário de produção eólica que vier a ocorrer, seja ele o mais desfavorável ou o mais ajustado à solução.

No entanto, nas abordagens heurísticas a problemas de escalonamento e pré-despacho é extremamente difícil garantir que uma determinada solução para o problema seja realmente a óptima. As dimensões do sistema em estudo e as restrições impostas conduzem a funções de avaliação elaboradas, com múltiplos máximos e mínimos locais. Os parâmetros que caracterizam um método de optimização baseado em metaheurísticas podem condicionar o espaço de pesquisa de soluções vizinhas de tal forma que a procura fique limitada a um desses mínimos locais.

A figura 3.1 ilustra uma função de avaliação abstracta com vários mínimos locais. Para este exemplo, o processo de optimização deverá estar orientado para devolver a solução que realmente representa o mínimo geral do problema.

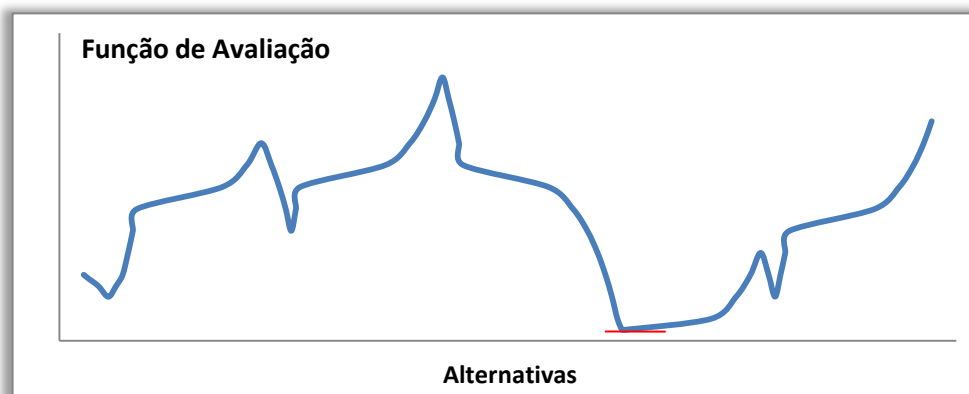


Figura 3.3 - Ilustração exemplo do problema

Neste trabalho, foram constituídas e ensaiadas duas funções de avaliação, de acordo com prioridades definidas previamente e com base nos indicadores referidos na secção 3.1.

As funções de avaliação seguem dois modelos distintos. O primeiro caracteriza-se por uma análise baseada na taxa de substituição⁴ entre os vários indicadores, de acordo com as prioridades valorizadas pelo operador de sistema. O segundo modelo é estabelecido com base em relações hierárquicas entre os mesmos indicadores.

3.3.1 - Modelo 1

Para estabelecer um modelo de análise baseado em *trade-off* entre os indicadores, é necessário estabelecer uma relação de compensação entre o Corte de carga, o Desperdício de eólica e o Custo de Operação. A relação de agregação entre os três agentes que caracterizam determinada solução é dada pela expressão

$$F = \alpha \cdot i^{CC} + \beta \cdot i^{DE} + CO \quad (3.14)$$

na qual α e β são atributos expressos em \$/MW contado e \$/MW desperdiçado, respectivamente, que quantificam economicamente o corte de carga e o desperdício de eólica. CO representa o custo total de operação da solução de escalonamento.

Com este tipo de abordagem é possível equilibrar a função de avaliação de acordo com os critérios do agente de decisão. A relação de *trade-off* entre os indicadores permite procurar soluções com determinado desperdício de eólica, por exemplo, se isso conduzir a uma solução com um corte de carga mínimo. Há a vantagem de minimizar o corte de carga por um lado, mas por outro não se garante o mínimo desperdício de eólica, a par dos custos de operação.

⁴ Frequentemente referido como *trade-off* na literatura internacional.

3.3.2 - Modelo 2

Neste modelo, a função de avaliação é constituída com base numa relação hierárquica entre as três características de determinada solução, o que permite ao operador de sistema escolher a ordem de prioridades com que pretende orientar a pesquisa de soluções de escalonamento para as máquinas térmicas. A valorização de cada índice depende da situação do sistema no período de escalonamento:

- Corte de carga - o deslastre de carga é um cenário que, em situações normais, se pretende sempre evitar. No entanto, o sistema poderá estar dotado de máquinas de arranque rápido, não consideradas na formulação do problema, com capacidade suficiente para compensar a falta de produção nos geradores térmicos. Nesta situação a pesquisa de soluções seria orientada de forma a minimizar o excedente de recurso renovável;
- Desperdício de eólica - Por outro lado, se o sistema estiver apto a canalizar eventual excesso de produção originado nos geradores eólicos para outros fins que não o consumo directo por parte das cargas (sistemas de bombagem nos aproveitamentos hídricos, exportação, etc.), a pesquisa de soluções passaria a valorizar a minimização do corte de carga, independentemente dos excessos de produção que poderiam surgir;
- Custo de Operação - O custo de operação é sempre o último nível das relações hierárquicas. Quaisquer que sejam os critérios de restrição à potência definidos pelo operador, ou até mesmo se não houver critérios de restrição, os custos operacionais são valores que se pretendem sempre minimizar na procura de soluções para o escalonamento.

Com base nestas indicações e atendendo ao carácter académico deste trabalho, os ensaios a realizar no problema de optimização do escalonamento por arrefecimento simulado, seguiram duas hipóteses distintas de hierarquização na procura da melhor solução.

1ª Hipótese - Excluir soluções com corte de carga

Os níveis de prioridades ficam definidos de acordo com a figura 3.4.

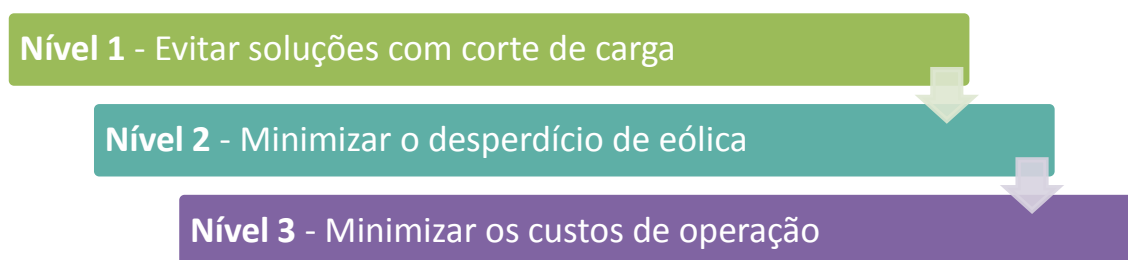


Figura 3.4 - Níveis hierárquicos para a primeira hipótese

A função de avaliação a aplicar neste critério é do tipo

$$F = BIG \cdot i^{DE} + CO \quad (3.15)$$

na qual BIG representa um atributo que sobrevalorize o desperdício de eólica, face ao custo de operação. Este elemento permite estabelecer a relação de hierarquização entre os índices de avaliação da solução.

2ª Hipótese - Excluir soluções com Desperdício de Eólica

Os níveis de prioridades ficam definidos de acordo com a figura 3.5.

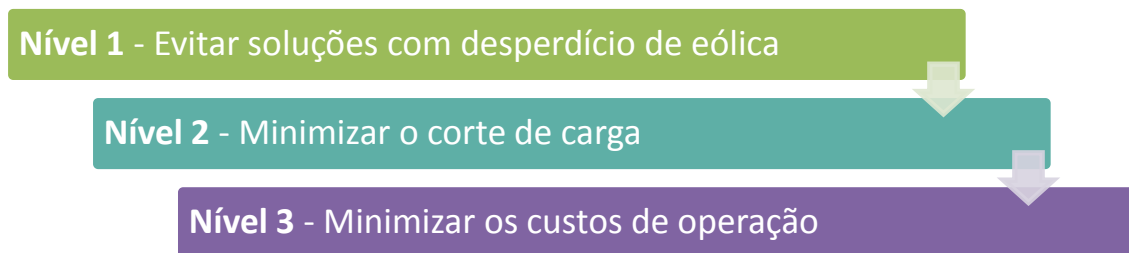


Figura 3.5 - Níveis hierárquicos para a segunda hipótese

A função de avaliação a aplicar neste critério é do tipo

$$F = BIG \cdot i^{CC} + CO \quad (3.16)$$

na qual BIG representa um atributo que sobrevalorize o corte de carga face ao custo de operação. Este elemento permite estabelecer a relação de hierarquização entre os índices de avaliação da solução.

A selecção da abordagem depende do sistema de energia em estudo que será alvo do processo de optimização. Devido às características físicas do sistema e dos valores envolvidos na potência de carga e potência renovável, pode haver situações em que não seja possível garantir a existência de soluções de escalonamento que não apresentem qualquer corte de carga, ou no segundo critério, de desperdício de eólica. Nestes casos e após ponderação prévia, é possível que se estabeleçam patamares de aceitação no primeiro nível de cada critério. Por exemplo, soluções que apresentem até 100MW de corte de carga podem ser consideradas aceitáveis. Nesse caso, o processo de optimização procuraria soluções que se enquadrassem nesta restrição. No entanto, o sistema considerado para este trabalho, que será introduzido no próximo capítulo, não carece deste tipo de avaliação.

Contudo, é possível utilizar outras funções de avaliação no processo de otimização, baseadas noutros indicadores e sem prejuízo da abordagem genérica do problema em questão.

3.4 - Implementação do processo

A aplicação informática capaz de solucionar o problema de otimização do escalonamento através da metaheurística *Simulated Annealing*, foi implementada com base nos pressupostos apresentados neste capítulo e seguindo o algoritmo da figura 3.6.

```

i. Inicialização do método:
    Constituição da solução inicial - x
    Definição dos parâmetros SA -  $T_0$ ,  $\alpha$ , L, Stop
ii. Iteração  $k = 1, 2, \dots, x_k$ :
     $L_k = L_k + 1$ 
    Gerar vizinho -  $x_k$ 
    Se  $F(x_k) < F(x)$  então
         $x = x_k$ 
         $Stop_k = Stop_k + 1$ 
    Senão,
        Definir número aleatório - r
        Se  $e^{(-\Delta F_k / T_n)} > r$  então
             $x = x_k$ ;
        Senão,
             $x = x_{k-1}$ ;
    Se  $L_k = L$  então
         $L_k = 0$ 
         $T_n = T_n \cdot \alpha$ ;
    Se  $Stop_k = Stop$ 
        Solução final =  $x_k$ ;
    Senão
         $k = k + 1$ 
        Regressar a ii.
  
```

Figura 3.6 - Algoritmo genérico do método *Simulated Annealing*

O programa foi testado para o sistema utilizado inicialmente por Karzalis em [15] e mais recentemente por Meirinhos em [11]. É um sistema composto por 10 geradores térmicos, dos quais foram considerados apenas 7 e por um diagrama de cargas distribuídas por 24 períodos.

Os cenários de produção eólica foram também recuperados do trabalho [11]. A utilização em comum destes cenários, sistema e plano de consumo teve como objectivo a posterior comparação de resultados e avaliação da robustez da ferramenta de optimização utilizada.

Capítulo 4

Apresentação e Análise de Resultados

Neste capítulo são apresentadas todas as características do sistema em estudo, nomeadamente os parâmetros das máquinas térmicas envolvidas, o diagrama de cargas que se pretende alimentar e as previsões que compõem os cenários de produção eólica. Os dados utilizados visam replicar os valores de potência envolvidos num sistema com características reais, embora numa escala de dimensão inferior.

Pretende-se com este sistema determinar uma solução de escalonamento robusta que melhor se adapte a qualquer um dos cenários de produção eólica considerados, de acordo com critérios estabelecidos previamente.

Os ensaios realizados seguiram as prioridades delineadas nos modelos de avaliação referidos no capítulo anterior.

As soluções de escalonamento iniciais e as obtidas através do processo de optimização são devidamente identificadas e apresentadas em anexo.

4.1 - Dados de entrada

Nesta secção são introduzidos os dados do sistema de energia em estudo, designadamente as características dos grupos de produção, a potência de carga e a potência eólica.

4.1.1 - Características dos geradores

Na tabela 4.1 são apresentados os parâmetros dos grupos produtores cujo escalonamento será alvo do processo de optimização: os limites de operação, os parâmetros associados à função custo de produção e os custos de ligar e desligar das máquinas.

Nota: Não foram atribuídos custos de desligar de máquinas com a finalidade de comparar *à posteriori* os resultados com os obtidos pelo José Meirinhos [11], na tese que desenvolveu dentro deste mesmo contexto do escalonamento.

Tabela 4.1 - Grupos Produtores

Parâmetro	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
$P_{\max}$ (MW)	500	455	130	130	162	80	85
$P_{\min}$ (MW)	150	150	20	20	25	20	25
A (€/h)	1000	970	700	680	450	370	480
B (€/MW.h)	16.19	17.26	16.6	16.5	19.7	22.26	27.74
C (€/MWh ²)	0.00048	0.00031	0.002	0.00211	0.00398	0.00712	0.00079
Custo de Ligar (€)	9000	10000	1100	1120	1800	340	520
Custo de Desligar (€)	0	0	0	0	0	0	0

4.1.2 - Diagrama de cargas

Na tabela 4.2 estão registados os valores previstos para o consumo em 24 períodos correspondentes às horas de determinado dia. É pressuposto que a carga permaneça constante em cada período.

Tabela 4.2 - Carga em cada período

Período	Carga (MW)	Período	Carga (MW)
1	700	13	1400
2	750	14	1300
3	850	15	1200
4	950	16	1050
5	1000	17	1000
6	1100	18	1100
7	1150	19	1200
8	1200	20	1400
9	1300	21	1300
10	1400	22	1100
11	1450	23	900
12	1500	24	800

O registo dos valores de consumo é usualmente representado de forma gráfica de modo a facilitar a percepção das horas de maior procura e das horas de vazio.

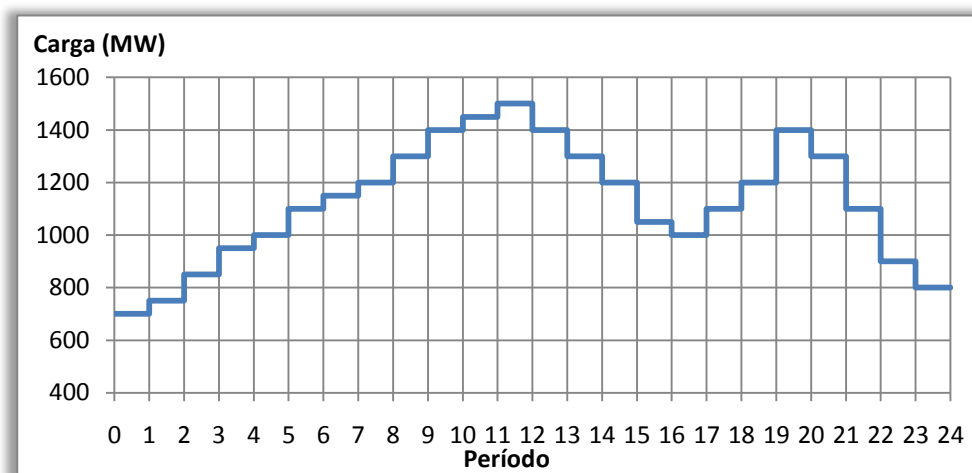


Figura 4.1 - Diagrama de cargas

4.1.3 - Cenários de produção eólica

As previsões de potência eólica para o mesmo conjunto de períodos permitem estabelecer 7 cenários de produção, cujos valores se encontram registados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Cenários de produção eólica (MW)

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

De forma semelhante ao diagrama de cargas, é possível representar graficamente os cenários de produção eólica. Desta forma, ficam também mais evidentes as horas de ponta e de vazio previstas para a disponibilidade da potência eólica.

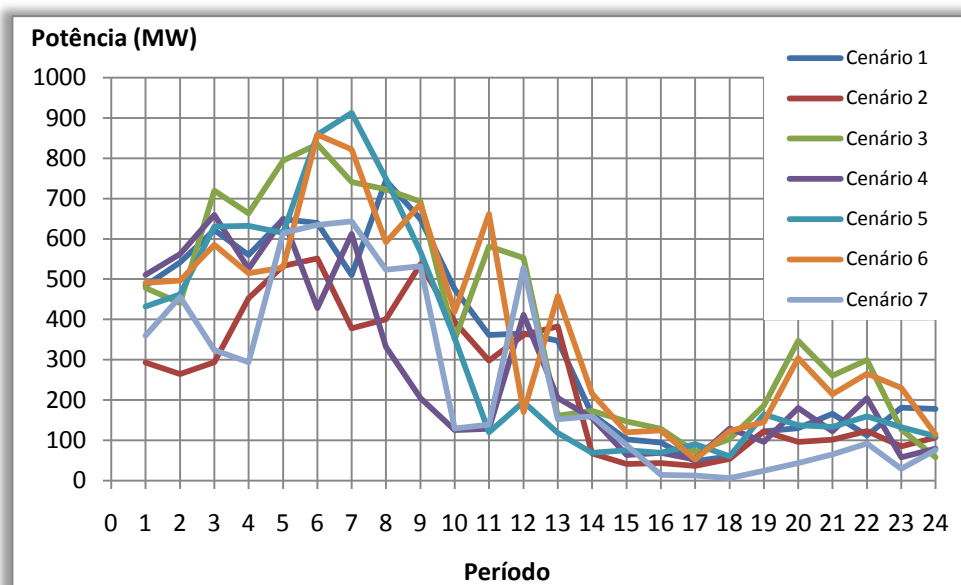


Figura 4.2 - Representação gráfica dos cenários de produção eólica

4.1.4 - Condições Iniciais

Em todas as simulações partiu-se do princípio que no período que antecede o início do processo, designado de período 0, se encontram ligadas as máquinas 1 e 2 sem qualquer custo acumulado.

Tabela 4.4 - Condições iniciais

Período	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	Custo acumulado
0	1	1	0	0	0	0	0	0

4.2 - Ensaios realizados

São apresentados de seguida os resultados obtidos para os modelos de avaliação de soluções referidos no capítulo anterior.

Cada solução obtida é analisada e comentada tendo em conta os indicadores corte de carga, desperdício de eólica e custo de operação.

A solução inicial a partir da qual se procede com o algoritmo de optimização foi estabelecida de forma aleatória para todos os ensaios efectuados, salvo indicação em contrário no próprio ensaio. As soluções iniciais utilizadas encontram-se também registadas em anexo.

4.2.1 - Modelo 1

O modelo 1 de avaliação de funções estabelece uma relação de *trade-off* entre os vários indicadores de acordo com a expressão

$$F = \alpha \cdot i^{CC} + \beta \cdot i^{DE} + CO \quad (4.1)$$

Ensaio I - Valor esperado

Os valores de α e β utilizados neste ensaio encontram-se registados na tabela 4.5.

O ensaio foi realizado considerando os índices agregados correspondentes ao valor médio na função de avaliação.

Tabela 4.5 - Trade-offs para os ensaios I e II

α (\$/MW)	β (\$/MW)
5000	1000

A solução encontrada pelo processo de optimização permitiu registar os valores acumulados dos três indicadores para cada cenário, de acordo com a tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resultados do ensaio I

Totais	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Custo de Operação (\$)	405398	444976	383486	436136	414062	390032	447171
Corte de Carga (MW)	0	0	0	0	0	0	0
Desperdício de Eólica (MW)	0	0	60	0	0	0	0

Tabela 4.7 - Índices do ensaio I

Valor esperado			Valor máximo		
i^{CO}_1 (\$)	i^{CC}_1 (MW)	i^{DE}_1 (MW)	i^{CO}_2 (\$)	i^{CC}_2 (MW)	i^{DE}_2 (MW)
417323	0	9	447170	0	60

A relação de *trade-off* utilizada permite beneficiar a selecção de soluções que tendem a minimizar o corte de carga. Independentemente do cenário que vier a ocorrer, não haverá qualquer corte de carga com esta solução. Ao nível do desperdício de eólica, apenas o cenário 3 apresenta 60MW de desperdício. ▀

Ensaio II - Valor máximo

Os valores de α e β utilizados são os mesmos do ensaio anterior, registados na tabela 4.5. Desta vez, o ensaio foi realizado considerando os índices agregados correspondentes ao valor máximo na função de avaliação.

A solução encontrada pelo processo de otimização permitiu registrar os valores acumulados dos três indicadores para cada cenário, de acordo com as tabelas 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8 - Resultados do ensaio II

Totais	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Custo de Operação (\$)	409474	449013	387469	440708	419072	393984	451837
Corte de Carga (MW)	0	0	0	0	0	0	0
Desperdício de Eólica (MW)	0	0	60	0	0	0	0

Tabela 4.9 - Índices do ensaio II

Valor esperado			Valor máximo		
i^{CO}_1 (\$)	i^{CC}_1 (MW)	i^{DE}_1 (MW)	i^{CO}_2 (\$)	i^{CC}_2 (MW)	i^{DE}_2 (MW)
421651	0	9	451837	0	60

Os indicadores de corte de carga e desperdício de eólica têm o mesmo valor por cenário que os registados no ensaio anterior. Os custos de operação aumentam ligeiramente com esta solução, verificando-se mesmo um custo máximo superior ao que foi obtido com a anterior solução de escalonamento. ▪

Uma breve análise aos dois primeiros ensaios permite concluir que o processo de otimização não está a funcionar convenientemente. Seria de esperar que no ensaio II a solução apresentasse índices idênticos aos obtidos no ensaio I ou piores no conjunto dos cenários, desde que o valor máximo de cada índice fosse inferior, o que não se verifica nesta solução. Os resultados do ensaio II apresentam os mesmos valores de corte e desperdício mas com custos de operação superiores aos resultados obtidos com ensaio I, ou seja, não se verificou uma minimização do máximo de cada índice tal como seria pretendido.

Ensaio III - Valor esperado

Neste ensaio, a relação de *trade-off* passa a valorizar o desperdício de eólica face aos restantes indicadores.

Os valores de α e β utilizados neste ensaio encontram-se registados na tabela 4.10 e foi realizado considerando os índices agregados correspondentes ao valor médio na função de avaliação.

Tabela 4.10 - Trade-offs para os ensaios III e IV

α (\$/MW)	β (\$/MW)
1000	5000

A solução obtida permite registrar os valores das tabelas 4.11 e 4.12.

Tabela 4.11 - Resultados do ensaio III

Totais	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Custo de Operação (\$)	414642	453500	391590	444809	423796	398961	456932
Corte de Carga (MW)	0	56	0	0	0	0	26
Desperdício de Eólica (MW)	0	0	20	0	0	0	0

Tabela 4.12 - Índices do ensaio III

Valor esperado			Valor máximo		
i^{CO}_1 (\$)	i^{CC}_1 (MW)	i^{DE}_1 (MW)	i^{CO}_2 (\$)	i^{CC}_2 (MW)	i^{DE}_2 (MW)
426318,7	12	3	456932	56	20

A nova relação permitiu encontrar uma solução que diminui o desperdício de eólica face às anteriores, tanto ao nível do valor esperado dos índices utilizado na função de avaliação, como no valor máximo do conjunto dos cenários. ▪

Ensaio IV - Valor máximo

Os valores de α e β utilizados são os mesmos do ensaio anterior, registados na tabela 4.10. O ensaio foi realizado considerando os índices agregados correspondentes ao valor máximo na função de avaliação.

A solução obtida permite registar os valores das tabelas 4.13 e 4.14.

Tabela 4.13 - Resultados do ensaio IV

Totais	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Custo de Operação (\$)	405314	443897	382871	436030	414413	390033	447259
Corte de Carga (MW)	0	56	0	10	0	0	37
Desperdício de Eólica (MW)	0	0	20	0	0	0	0

Tabela 4.14 - Índices do ensaio IV

Valor esperado			Valor máximo		
i^{CO}_1 (\$)	i^{CC}_1 (MW)	i^{DE}_1 (MW)	i^{CO}_2 (\$)	i^{CC}_2 (MW)	i^{DE}_2 (MW)
417116,6	15	3	447259	56	20

Com este ensaio, a solução encontrada permitiu manter os valores máximos de corte e desperdício e simultaneamente minimizar os custos de operação, quando comparada com a solução anterior. ▪

A relação de *trade-off* que favorece a minimização do desperdício de eólica face aos restantes indicadores apresentou resultados mais coerentes com o que era esperado do processo de optimização. Comparando os ensaios III e IV, a função objectivo utilizada em IV permitiu encontrar uma solução que, mantendo os mesmos valores máximos de corte e desperdício que em III, consegue reduzir os custos operacionais. A solução IV, apesar de apresentar cortes mais pequenos em alguns dos restantes cenários, não têm implicações na função objectivo definida nesse ensaio, cumprindo o esperado do processo de optimização.

A análise gráfica dos ensaios realizados para este modelo permite ter uma melhor percepção dos resultados.

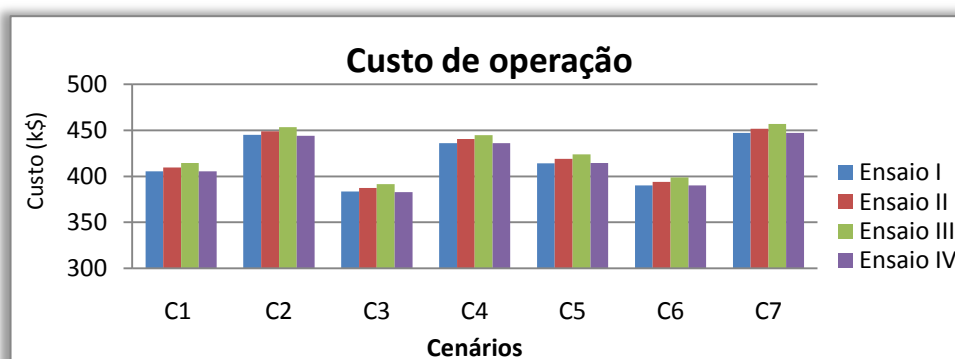


Figura 4.3 - Representação dos custos de operação

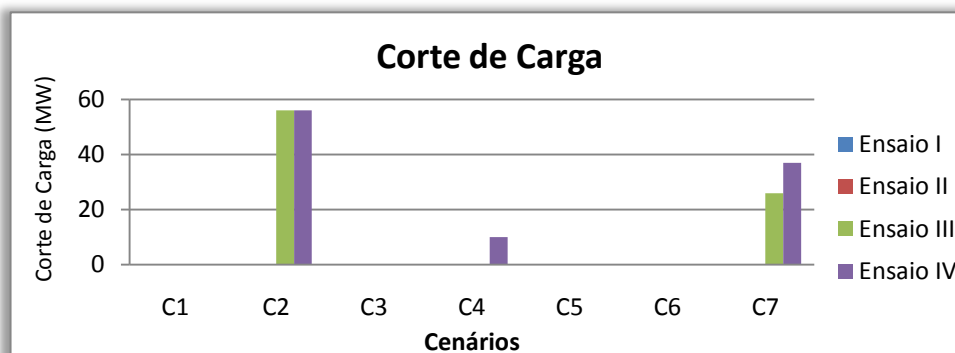


Figura 4.4 - Representação do corte de carga

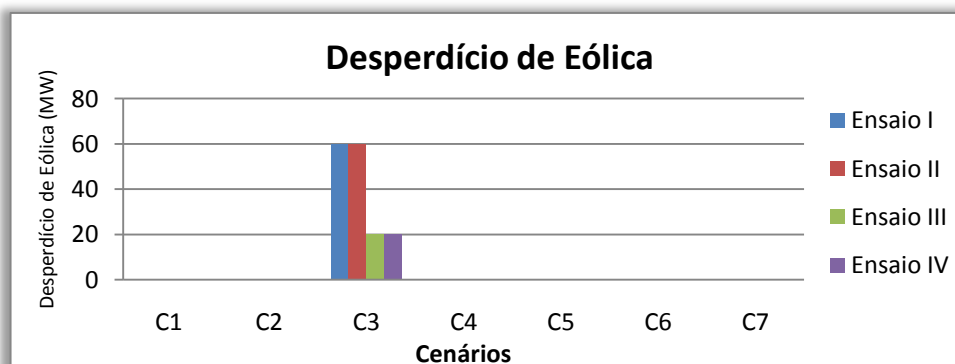


Figura 4.5 - Representação do desperdício de eólica

Avaliando os cenários de produção eólica individualmente para as quatro soluções de escalonamento obtidas, os cenários 2 e 7 são claramente os mais desfavoráveis ao nível dos custos de operação e do corte de carga. O cenário 3 é o que apresenta menor custo de produção para as soluções de escalonamento obtidas, no entanto, é o único que regista desperdício de eólica.

Ao nível do desempenho da aplicação baseada em *Simulated Annealing* não se pode afirmar que o processo de optimização cumpre plenamente o que seria pretendido para o modelo 1 de avaliação, dado que os ensaios I e II apresentam resultados inconsistentes.

4.2.2 - Modelo 2

O modelo 2 de avaliação permite seleccionar soluções através de uma relação hierárquica entre os três índices que as caracterizam.

Ensaio V

Pretende-se com este ensaio encontrar uma solução de escalonamento sem corte de carga que minimize o desperdício de eólica e em último nível que minimize os custos de operação. A função de avaliação foi implementada considerando valor esperado de cada indicador.

Tabela 4.15 - Resultados do ensaio V

Totais	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Custo de Operação (\$)	421506	461592	399504	452294	430720	406630	463740
Corte de Carga (MW)	0	0	0	0	0	0	0
Desperdício de Eólica (MW)	0	0	60	0	0	0	0

Tabela 4.16 - Índices do ensaio V

Valor esperado			Valor máximo		
i^{CO}_1 (\$)	i^{CC}_1 (MW)	i^{DE}_1 (MW)	i^{CO}_2 (\$)	i^{CC}_2 (MW)	i^{DE}_2 (MW)
433712	0	9	463740	0	60

Estes resultados, quando comparados com os da solução I obtida anteriormente, permitem verificar novamente alguma desconformidade no processo de optimização. Seria de esperar que, com esta função de avaliação, a solução apresentasse índices globais iguais ou menores aos que foram obtidos na solução I, uma vez que se pretende minimizar cada um de acordo com a ordem hierárquica. No entanto, não é possível verificar essa situação pois os

custos de operação da solução V são superiores aos da solução I, para os mesmos valores de corte de carga e desperdício de eólica. ▪

Ensaio VI

Este ensaio é em tudo idêntico ao anterior, excepto na função de avaliação que foi implementada considerando agora o valor máximo de cada indicador.

Tabela 4.17 - Resultados do ensaio VI

Totais	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Custo de Operação (\$)	419359	460508	396808	450122	428702	404073	462269
Corte de Carga (MW)	0	0	0	0	0	0	0
Desperdício de Eólica (MW)	0	0	0	7	0	0	0

Tabela 4.18 - Índices do ensaio VI

Valor esperado			Valor máximo		
i^{CO}_1 (\$)	i^{CC}_1 (MW)	i^{DE}_1 (MW)	i^{CO}_2 (\$)	i^{CC}_2 (MW)	i^{DE}_2 (MW)
431692	0	1	462269	0	7

A solução apresentada é coerente com os critérios de optimização, pois não apresenta qualquer corte de carga e o máximo valor de desperdício é mínimo quando comparada com soluções anteriores. Apesar de se verificar a ordem hierárquica de optimização, o custo máximo de operação é ligeiramente superior quando comparado com a solução II. ▪

Ensaio VII

Considera-se de seguida a segunda hipótese do modelo 2 de avaliação com a qual se pretende encontrar uma solução que anule o desperdício de eólica em todos os cenários e minimize o corte de carga seguido dos custos de operação. O ensaio foi realizado para o valor esperado dos indicadores.

Tabela 4.19 - Resultados do ensaio VII

Totais	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Custo de Operação (\$)	424178	466392	401658	454972	434111	409653	466956
Corte de Carga (MW)	0	0	0	0	0	0	0
Desperdício de Eólica (MW)	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 4.20 - Índices do ensaio VII

Valor esperado			Valor máximo		
i^{CO}_1 (\$)	i^{CC}_1 (MW)	i^{DE}_1 (MW)	i^{CO}_2 (\$)	i^{CC}_2 (MW)	i^{DE}_2 (MW)
436846	0	0	466956	0	0

Com esta solução consegue-se anular não só o desperdício de eólica, tal como era pretendido, mas também o corte de carga em qualquer dos cenários. O custo de operação é o elemento que caracteriza esta solução, apesar de não ser possível garantir que seja realmente o mínimo do problema. ▪

Ensaio VIII

Este ensaio é em tudo idêntico ao anterior, excepto na função de avaliação que foi implementada considerando agora o valor máximo de cada indicador.

Tabela 4.21 - Resultados do ensaio VIII

Totais	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Custo de Operação (\$)	417877	459315	395297	448445	427025	402846	460466
Corte de Carga (MW)	0	0	0	10	0	0	0
Desperdício de Eólica (MW)	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 4.22 - Índices do ensaio VIII

Valor esperado			Valor máximo		
i^{CO}_1 (\$)	i^{CC}_1 (MW)	i^{DE}_1 (MW)	i^{CO}_2 (\$)	i^{CC}_2 (MW)	i^{DE}_2 (MW)
430181	1.4	0	460466	10	0

Novamente, verifica-se alguma anomalia no algoritmo de optimização, pois seria de esperar que, com este ensaio, se obtivesse uma solução de escalonamento com características idênticas ou melhores que as obtidas em VII. No entanto, esta solução proporciona corte de carga e, consequentemente, contradiz os pressupostos da função de avaliação para este ensaio quando comparado com resultados anteriores. ▪

Apresentam-se, de seguida, os gráficos de comparação entre as soluções obtidas nos vários ensaios para o modelo 2 de avaliação.

Para as soluções determinadas por estes ensaios, os cenários 2 e 7 mantêm-se como os mais desfavoráveis ao nível dos custos de operação.

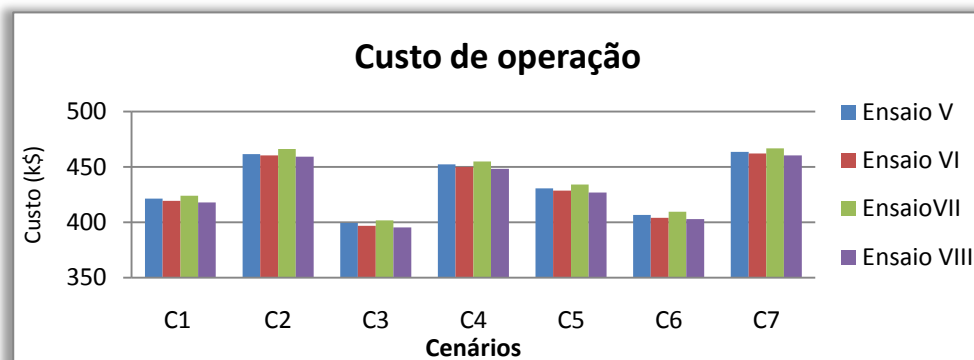


Figura 4.6 - Representação dos custos de operação

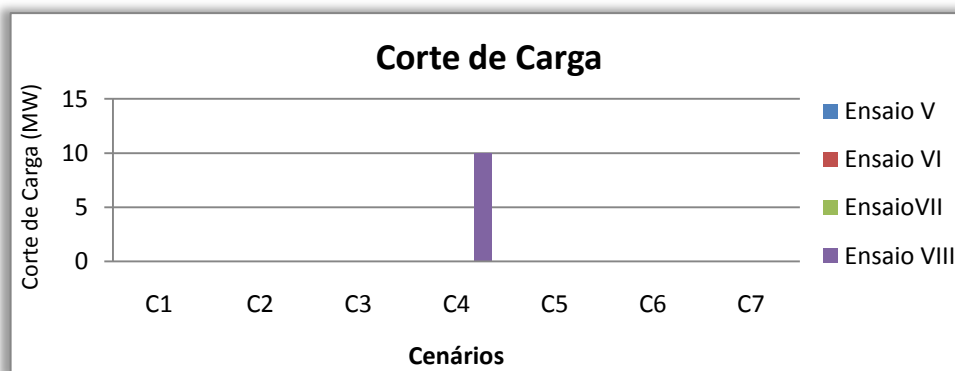


Figura 4.7 - Representação do corte de carga

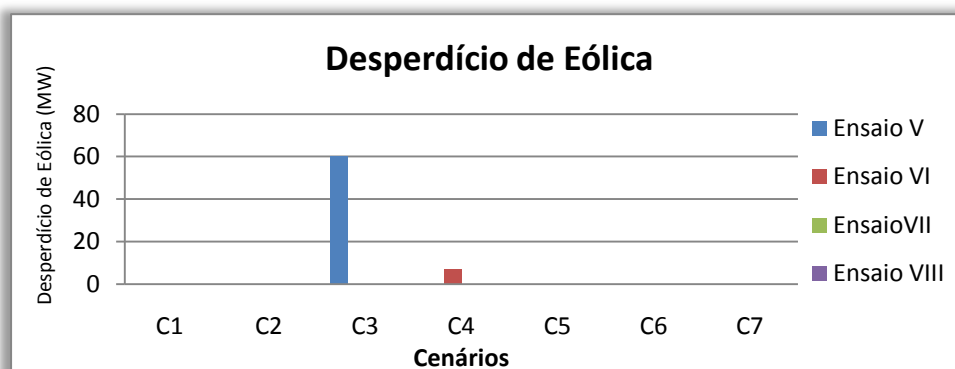


Figura 4.8 - Representação do desperdício de eólica

4.2.3- Ensaios complementares

O algoritmo de optimização por SA inicializa-se a partir de uma solução de escalonamento genérica. Nos ensaios anteriores, essa solução inicial foi definida de forma aleatória.

De seguida, são apresentados os resultados de uma solução obtida com base na relação de *trade-off* que beneficia a minimização do desperdício de eólica do modelo 1 de avaliação, com o objectivo de estudar a influência da solução inicial neste processo de optimização. A escolha desta função de avaliação deve-se à coerência dos resultados obtidos com os ensaios III e IV.

A solução inicial, agora definida, foi obtida a partir do trabalho [11] e está representada em anexo com a designação de A7.

Ensaio XIX - Valor esperado

Os valores de α e β utilizados na relação de *trade-off* são os mesmos do ensaio III, registados na tabela 4.10. O ensaio foi realizado considerando os índices agregados correspondentes ao valor esperado na função de avaliação.

A solução encontrada pelo processo de otimização permitiu registrar os valores acumulados dos três indicadores para cada cenário, de acordo com as tabelas 4.23 e 4.24.

Tabela 4.23 - Resultados do ensaio XIX

Totais	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Custo de Operação (\$)	407841	447357	386047	438978	416752	392838	448810
Corte de Carga (MW)	0	0	0	0	0	0	0
Desperdício de Eólica (MW)	0	0	40	2	0	0	0

Tabela 4.24 - Índices do ensaio XIX

Valor esperado			Valor máximo		
i^{CO}_1 (\$)	i^{CC}_1 (MW)	i^{DE}_1 (MW)	i^{CO}_2 (\$)	i^{CC}_2 (MW)	i^{DE}_2 (MW)
419803	0	6	448810	0	40

Os resultados deste ensaio não foram promissores. Seria de esperar que a aplicação no programa de uma solução inicial determinada através de outro processo de otimização proporcionasse a sua convergência para uma solução de escalonamento equivalente ou melhor do que quando foi inicializado a partir de uma solução constituída aleatoriamente. Comparando os indicadores desta solução com a que foi obtida no ensaio III é possível verificar que isso não acontece.

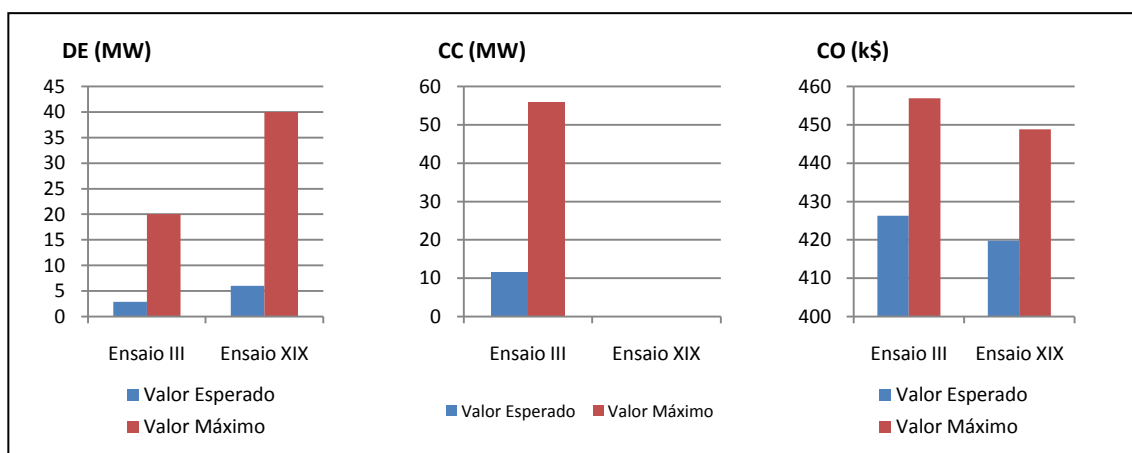


Figura 4.9 - Comparação de indicadores

O desperdício de eólica é maior na solução XIX do que na solução III, apesar dos restantes indicadores serem inferiores, o que permite concluir que o processo de otimização não beneficiou de uma solução inicial melhor.

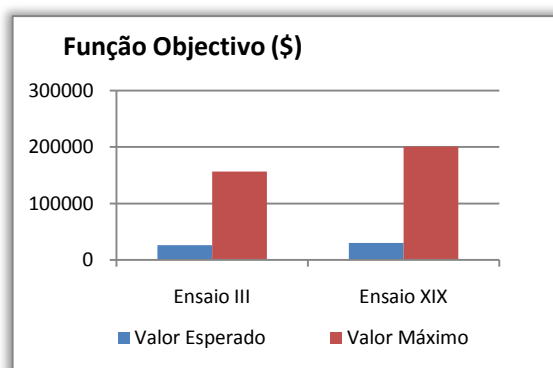


Figura 4.10 - Comparação da função objectivo

Essa ilação também se evidencia pela função objectivo que não sofreu melhoria com este ensaio. ▀

O próximo e último ensaio teve como objectivo a comparação da metodologia de resolução do problema de escalonamento aplicada neste trabalho com a desenvolvida em [11].

A função de avaliação utilizada é coerente em ambos os trabalhos e parte de uma relação de *trade-off* semelhante à estabelecida no modelo 1, mas que considera apenas o custo de redespacho CR de uma solução em cada um dos cenários de produção eólica.

$$F = \alpha \cdot i^{CC} + \beta \cdot i^{DE} + CR \quad (4.2)$$

Ensaio XX - Valor máximo

Os valores de α e β utilizados são os mesmos do ensaio I, registados na tabela 4.5. O ensaio foi realizado considerando os índices agregados correspondentes ao valor máximo na função de avaliação, assegurando assim a total coerência entre indicadores e função de avaliação.

A solução obtida permite registar os seguintes valores:

Tabela 4.25 - Resultados do ensaio XX

Totais	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Custo de Redespacho (\$)	388148	427979	366543	418976	397880	373543	429452
Corte de Carga (MW)	0	0	0	0	0	3	0
Desperdício de Eólica (MW)	0	0	60	0	0	0	0

Tabela 4.26 - Índices do ensaio XX

Valor esperado			Valor máximo		
CR (\$)	i^{CC}_1 (MW)	i^{DE}_1 (MW)	CR (\$)	i^{CC}_2 (MW)	i^{DE}_2 (MW)
400360	0,4	8,6	429452	3	60

A aplicação desenvolvida neste trabalho permitiu encontrar uma solução que se adapta melhor ao conjunto dos cenários, considerando a relação referida na função de avaliação. Os valores dos indicadores permitem registar uma melhoria significativa na função F , como se pode observar na figura 4.11.

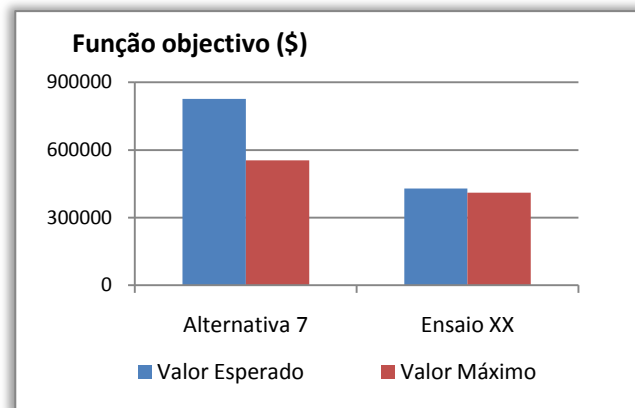


Figura 4.11 - Comparação da função objectivo

Fica assim concluída a análise do processo de optimização baseado em *Simulated Annealing* desenvolvido neste trabalho.

O algoritmo desenvolvido revelou algumas imperfeições no processo de optimização. O problema do escalonamento é complexo, com um elevado número de restrições, pelo que a sua resolução através de processos de optimização requer uma adaptação e configuração detalhada do próprio método ao sistema em análise, para que as soluções de escalonamento apresentadas se aproximem o mais possível da solução óptima e correspondam às exigências definidas nas funções de avaliação.

O aperfeiçoamento da metodologia apresentada neste trabalho requer mais investigação e desenvolvimento, ficando assim estabelecido o mote para trabalhos futuros dentro desta área específica de optimização em problemas de escalonamento e pré-despacho.

Capítulo 5

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do estudo realizado.

A aplicação da metodologia desenvolvida ao sistema em estudo permite constituir soluções com características distintas que, por sua vez, permitem avaliar o desempenho do algoritmo SA para este problema de escalonamento com integração de potência eólica.

São também introduzidos, de forma sintetizada, métodos de optimização alternativos à resolução do problema e eventuais aspectos do algoritmo SA passíveis de investigação em trabalhos futuros.

5.1 - Conclusões gerais

O desenvolvimento trabalho passou pela implementação de uma metodologia de optimização para o problema do escalonamento e pré-despacho em sistemas com elevada produção eólica. A aplicação dessa metodologia a um sistema exemplo permitiu encontrar diversas soluções de escalonamento com base nos pressupostos estabelecidos nos modelos de avaliação.

Cada solução é caracterizada por um custo de operação, um valor de corte de carga e um de desperdício de eólica. Estes três indicadores são ponderados nas funções de avaliação de soluções através do seu valor médio e máximo no conjunto dos cenários de produção eólica.

A flexibilidade de ajuste da função de avaliação aos interesses do operador do sistema torna este processo numa ferramenta versátil, capaz de apresentar soluções enquadradas com as restrições do problema. No entanto, a aplicação revelou algumas falhas no processo de optimização apresentando por vezes soluções inconsistentes quando comparadas entre si e atendendo às prioridades das funções de avaliação.

A convergência do algoritmo para uma determinada solução de escalonamento revelou ser um processo demorado, sendo necessárias algumas horas de computação (aproximadamente 2 horas em cada ensaio) para a assegurar.

Para finalizar, realça-se que a execução do trabalho correspondeu aos objectivos inicialmente propostos, com a adaptação de um algoritmo de optimização ao problema do escalonamento. Apesar de requerer alguns melhoramentos, a aplicação desenvolvida permite encontrar soluções viáveis e coerentes com as restrições impostas pelo sistema.

5.2 - Trabalhos Futuros

Numa perspectiva científica e de investigação, existem aspectos do próprio processo de optimização por SA que podem e devem ser explorados e melhorados.

Ao nível da pesquisa de soluções vizinhas, seria interessante explorar esquemas de vizinhança alternativos ao usado neste trabalho, nos quais a pesquisa de soluções seria orientada de forma a minimizar os custos de transição, por exemplo.

O esquema de arrefecimento também é outro factor que pode ser melhorado, acelerando a convergência do método e desta forma reduzindo substancialmente o tempo de computação.

Em alternativa ao *Simulated Annealing*, existem novos processos de optimização baseados em algoritmos evolucionários, cuja adaptação a problemas de escalonamento e pré-despacho pode conduzir a soluções igualmente satisfatórias. A combinação de algoritmos também é usual nas investigações já realizadas, estabelecendo-se modelos híbridos para a resolução do problema [25].

Numa perspectiva comercial do trabalho aqui apresentado e atendendo ao seu carácter académico, subsistem reservas em ajustar a aplicação desenvolvida a sistemas maiores mais complexos. No entanto, o processo de optimização revelou ter potencial para solucionar problemas de maior dimensão, pelo que seria um desafio interessante desenvolver uma aplicação mais robusta e flexível, com possibilidade de interagir directamente com o operador de sistema, a partir da qual se definiria o plano de escalonamento das máquinas térmicas disponíveis para um horizonte de previsões de potência eólica a longo prazo.

Referências

- [1] Centro de Informação da Rede Eléctrica Nacional. Disponível em <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT>. Último acesso em Junho de 2011.
- [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] Forum global do sector da energia eólica - Global Wind Energy Council . Disponível em <http://www.gwec.net/>. Último acesso em Junho de 2011.
- [5] L. Xie, P. M. S. Carvalho, L. A. F. M. Ferreira, J. Liu, B. H. Krough, N. Popli, M. D. Ilić, "Wind Integration in Power Systems: Operational Challenges and Possible Solutions", *Proceedings of the IEEE*, vol. 99 no. 1, Janeiro 2011.
- [6] B. C. Ummels, M. Gibescu, E. Pelgrum, W. L. Kling e A. J. Brand, "Impacts of Wind Power on Thermal Generation Unit Commitment and Dispatch" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 1, 2007
- [7] M. Matos, R. Bessa, "Operating Reserve Adequacy Evaluation using Uncertainties of Wind Power Forecast", *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, 2009.
- [8] S. Chakraborty, T. Senjyu, A. Yona, T. Funabashi, "Security Constrained Unit Commitment Strategy for Wind/Thermal Units Using Lagrangian Relaxation based Particle Swarm Optimization", *IEEE IPEC*, pp. 549-554, 2011.
- [9] 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 2011
- [10] 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.

- [11] José Luís Monteiro Meirinhos, "Escalonamento e Pré-Despacho incluindo Produção Eólica", Dissertação de mestrado, FEUP, 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] A. Viana, J. P. de Sousa, M. Matos, "Simulated Annealing for the unit commitment problem", *IEEE Porto Power Tech Conference*, 2001.
- [14] A. Viana, J. P. de Sousa e M. Matos, "A new metaheuristic approach to the unit commitment problem", 14th Power Systems Computation, 2002. Disponível em http://www.psc-central.org/uploads/tx_ethpublications/s05p05.pdf. Último acesso em Junho de 2011.
- [15] 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.
- [16] João Tomé Saraiva, "Planeamento da expansão/Planeamento da operação", Apontamentos para a disciplina de MQUA, FEUP, 2011.
- [17] José Fernando da Costa Oliveira, "Problemas de Posicionamento de Figuras Irregulares - Uma perspectiva de optimização", Dissertação de doutoramento, FEUP, 1995.
- [18] F. Zhuang e F. D. Galiana, "Unit Commitment by Simulated Annealing," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 311-317, 1990.
- [19] J.J. Grainger e W.D. Stevenson, "Power Systems Analysis", McGraw-Hill, 1994.
- [20] G.B.Sheble e G.N.Fahd, "Unit commitment literature synopsis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 128-135, 1994.
- [21] D. Simopoulos e G. Contaxis, "Unit Commitment with Ramp Rate Constraints Using the Simulated Annealing Algorithm", *IEEE MELECON*, pp. 845-849, 2004.
- [22] M. Pirlot, "General local search methods", *European Journal of Operational Research* 92, pp. 493-511, 1996.
- [23] M. H. Albadi e E. F. El-Saadany, "Comparative study on impacts of wind profiles on thermal units scheduling costs", *IET Renewable Power Generation*, 2009.
- [24] A. Y. Saber, T. Senjyu, T. Miyagi, N. Urasaki e T. Funabashi, "Unit commitment by heuristics and absolutely stochastic simulated annealing", *IET Gener. Transm. Distrib.*, pp. 234-243, 2007.
- [25] H. A. Mantany, Y. L. Abdel-Magid e S. Z. Selim, "Integrating Genetic Algorithms, Tabu Search, and Simulated Annealing for the Unit Commitment Problem", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 3, Agosto 1999.

Anexos

Tabela A.1 - Soluções iniciais de escalonamento

		Período																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Solução Aleatória	G ₁	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
	G ₂	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	
	G ₃	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	
	G ₄	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	
	G ₅	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	
	G ₆	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	
	G ₇	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	
Solução A7 [11]	G ₁	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	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	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	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	
	G ₅	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
	G ₆	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
	G ₇	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	

Tabela A.2 - Solução de escalonamento para o ensaio I

[illegible]

Tabela A.3 - Solução de escalonamento para o ensaio II

		Período																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Solução – Ensaio II	G ₁	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	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G ₃	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	G ₄	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0
	G ₅	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	G ₆	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
	G ₇	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Tabela A.4 - Solução de escalonamento para o ensaio III

		Período																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Solução – Ensaio III	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	1	0	0	0	0	0	0	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	0	0	0	0	0	0
	G ₄	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
	G ₅	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	G ₆	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
	G ₇	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0

Tabela A.5 - Solução de escalonamento para o ensaio IV

		Período																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Solução – Ensaio IV	G ₁	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	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	G ₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	G ₄	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
	G ₅	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1
	G ₆	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	G ₇	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0

Tabela A.6 - Solução de escalonamento para o ensaio V

		Período																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Solução – Ensaio V	G ₁	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	G ₂	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	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	G ₄	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
	G ₅	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 ₆	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
	G ₇	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Tabela A.7 - Solução de escalonamento para o ensaio VI

		Período																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Solução – Ensaio VI	G ₁	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	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G ₃	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0
	G ₄	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	G ₅	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	G ₆	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1
	G ₇	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela A.8 - Solução de escalonamento para o ensaio VII

		Período																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Solução – Ensaio VII	G ₁	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 ₂	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G ₃	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	G ₄	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
	G ₅	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	G ₆	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
	G ₇	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1

Tabela A.9 - Solução de escalonamento para o ensaio VIII

		Período																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Solução – Ensaio VIII	G ₁	1	0	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	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	G ₃	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0
	G ₄	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
	G ₅	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	G ₆	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	G ₇	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela A.10 - Solução de escalonamento para o ensaio XIX

		Período																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Solução – Ensaio XIX	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	0	1
	G ₃	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0
	G ₄	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
	G ₅	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0
	G ₆	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1
	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

Tabela A.11 - Solução de escalonamento para o ensaio XX

		Período																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Solução – Ensaio XX	G ₁	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	0	0	0	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	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
	G ₄	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
	G ₅	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	G ₆	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	G ₇	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0