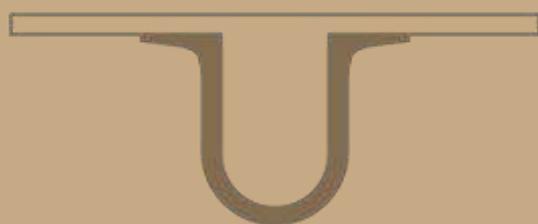




UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Daniela da Silva Coito

**ESTUDO COMPARATIVO SOBRE MODELOS
DE GESTÃO DE OPERAÇÕES EM POSTOS DE
TRANSFORMAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO**

**Dissertação em Estatística, Otimização e Matemática Financeira
no âmbito do Mestrado em Matemática coorientada pelo
Professor Doutor José Luis Esteves dos Santos e pelo Engenheiro
Diogo Lemos Alves Lopes (EDP Distribuição).**

Junho de 2019

Estudo comparativo sobre modelos de gestão de operações em postos de transformação de distribuição

Daniela da Silva Coito



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Mestrado em Matemática

Master in Mathematics

Dissertação em Estatística, Otimização e Matemática Financeira
Dissertation in Statistics, Optimization and Financial Mathematics

Junho 2019 / June 2019

Agradecimentos

Para se chegar a bom porto, o apoio de várias pessoas é fundamental, razão pela qual aproveito para deixar aqui os meus sinceros agradecimentos a todos os que se cruzaram no meu caminho e tornaram possível este percurso.

Em primeiro lugar, agradeço ao Departamento de Matemática da Universidade de Coimbra pela possibilidade de incluir um estágio curricular neste meu último ano de estudos, em especial ao Professor Doutor José Augusto e à Professora Doutora Marta Pascoal.

Em segundo lugar, à Energias de Portugal (EDP) Distribuição por me acolher no estágio e me fornecer todas as ferramentas necessárias para conseguir desenvolver o meu trabalho nas melhores condições possíveis.

Um agradecimento também muito especial aos meus Orientadores. Ao Professor Doutor José Luis Santos por todas as vezes que se deslocou à empresa onde estive a estagiar e por todo o apoio prestado ao longo da Dissertação, disponibilizando-se prontamente para agendar reuniões quando tal se afigurava necessário. Agradeço igualmente ao Engenheiro Diogo Lemos, pela prestabilidade que sempre demonstrou e por, principalmente, se ter revelado um pilar fundamental durante o meu percurso na empresa, o qual, não obstante não nos encontrarmos no meu espaço de trabalho, nunca encarou tal facto como um impedimento, permitindo sempre expor as minhas dúvidas e mostrando-se sempre disponível para quaisquer esclarecimentos. A todas as pessoas com quem me cruzei na EDP Distribuição, concretamente os meus colegas estagiários e bem assim aos Engenheiros Jorge Seíça, Valter Santos, Ricardo Santos, José Carlos e ao Luís Miguel, cumpre-me igualmente reconhecer todo o apoio que sempre manifestaram durante este último ano académico.

Em momento algum, poderei colocar de parte o apoio incondicional que me foi dado pelos meus, aqueles que sempre acompanharam de perto o meu percurso, do início ao fim, que estiveram presentes em todas as etapas desta longa caminhada, que viveram comigo as vitórias e momentos menos gratificantes e que permitiram que pudesse hoje escrever este texto. À minha família, pais, irmão e avó, por todas as vezes que me motivaram e abdicaram do seu tempo para me auxiliar no meu percurso académico, ficarei eternamente grata.

Como não poderia deixar de ser, cumpre-me ainda reconhecer o papel importante que o meu namorado assumiu ao longo da elaboração deste relatório - aquele que, com o seu esforço e dedicação, não me desamparou e fez questão de acompanhar o desenvolvimento de todo este trabalho.

Por último, quero agradecer à minha colega de quarto, Daniela Soares da Costa, pelo auxílio prestado e bem como ainda a Isabel Maria Faria, por terem ambas contribuído para a revisão ortográfica.

A todos, o meu sincero obrigada.

Daniela da Silva Coito

Resumo

No contexto da disciplina de Dissertação de Estatística, Otimização e Matemática Financeira surgiu a oportunidade de realizar um estágio na EDP Distribuição. Este estágio teve como principal objetivo desenvolver um modelo matemático que permita realizar de forma eficiente a gestão de operações (instalação e manutenção) de ativos de contagem que se encontram nos postos de transformação de distribuição.

No decorrer do trabalho consideram-se dois modelos diferentes, sendo que o objetivo de ambos é encontrar uma solução para a afetação das equipas às tarefas relacionadas com ordens pendentes.

O primeiro modelo determina o número de equipas necessárias disponíveis e a forma como alocá-las em cada tarefa com o objetivo de minimizar as ordens pendentes de manutenção.

Em alternativa, o segundo modelo minimiza as equipas disponíveis alocadas em cada tarefa onde após um certo instante apenas tolera algumas ordens pendentes. Este último permite obter a curva de Pareto quando confrontado o número de equipas utilizada com a tolerância estabelecida para as ordens pendentes. Esta curva revela-se uma grande mais-valia na empresa como ferramenta de apoio à decisão. Assim, modelam-se dois processos (número de ordens pendentes e número de equipas disponíveis) em ambas as estruturas, usando uma formulação de tempo discreto de programação linear inteira mista.

O estudo separado de cada um destes problemas é discutido na literatura em outros contextos. No entanto, quando se consideram os dois problemas em simultâneo, a literatura é mais escassa.

As soluções obtidas pelos modelos permitem uma alocação dinâmica, ajustando as alocações das equipas consoante as necessidades em cada período. Para cada modelo é possível encontrar soluções ótimas ou próximas destas, bem como soluções implementadas por uma heurística no caso de não se encontrar disponível um software de otimização dentro da empresa, salientando as vantagens encontradas nas soluções obtidas com os modelos.

Palavras-chave: Curva de Pareto, Gestão de operações, Modelação, Programação linear inteira mista.

Abstract

In the context of the course of Dissertations in Statistics, Optimization and Financial Mathematics, it appears the opportunity to do an EDP Distribuição internship. The main goal of this internship was to develop a mathematical model that allows to perform efficiently the operation management (installation and maintenance) of counting assets which are present in distribution transformer stations. During this thesis, it's consider two different models with the purpose of finding solution that assigns the necessary teams to the task related, related with the pending orders.

The first model determines the number of teams that are necessary and the way to allocate them in each task with the objective to minimize the pending maintenance orders.

Alternatively, the second model minimizes the number of available teams that are allocated in each task where after a certain instant it only tolerates some pending orders. It also allows to obtain the Pareto curve when comparing the number of teams used with the established tolerance for pending orders.

Thus, two processes are modeled (number of pending orders and number of available teams) in both structures, using a discrete time formulation of mixed integer linear programming.

The study for each problem separately is discussed in the literature in other contexts. However, when both problems are considered simultaneously, the literature is scarcer.

The solutions obtained by the models allows a dynamic allocation, adjusting the teams allocation according to the needs of each period of time. For each model is possible to find optimal solutions or near them, as well as heuristic solutions in case there is no optimization software available within the company, pointing out the benefits found in the obtained solutions in the models.

Key-words: Mixed integer programming, Modelling, Operations Management, Pareto curve.

Conteúdo

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
1 Introdução	1
2 EDP Distribuição e os postos de transformação de distribuição	5
2.1 Introdução	5
2.2 Contextualização do problema na empresa	6
2.3 Descrição do problema	7
2.4 Dados reais do problema	8
2.5 Situação atual	10
2.5.1 Avaliação da situação atual	10
3 Estado de Arte	13
4 Modelo 1: minimização número de ordens pendentes de manutenção	15
4.1 Modelo M1	16
4.1.1 Aplicação do modelo	18
4.1.2 Alteração das restrições das ordens pendentes de instalação	22
4.2 Heurística H1	26
4.3 Simulador	29
4.3.1 Simulação da solução do modelo M1.3	31
4.3.2 Simulação da solução heurística H1	33
5 Modelo 2: minimização do número de novas de equipas disponíveis	37
5.1 Modelo M2	37
5.1.1 Aplicação do modelo	38
5.2 Curva de Pareto	41
5.3 Heurística H2	42
5.4 Simulador	44
5.4.1 Simulação da solução do modelo M2	44
5.4.2 Simulação da solução heurística H2	46

6 Conclusão	49
Bibliografia	51
Anexo A Código dos programas de MATLAB	53
A.1 Heurística	53
A.2 Simulador	57
Anexo B Gráficos - Relação do número de ordens pendentes de manutenção com o número de equipas em cada empresa na solução do modelo M1.3	59
Anexo C Gráficos - Relação do número de ordens pendentes de manutenção com o número de equipas em cada empresa na solução do modelo M2 com $k = 1$	63

Lista de Figuras

2.1	Fluxo energético desde a produção até ao consumidor.	5
2.2	Análise do comportamento das ordens pendentes ao longo do período de estudo com os dados fornecidos pelas empresas 3 e 4.	11
2.3	Análise do comportamento das ordens pendentes ao longo do período de estudo com os dados fornecidos pelas empresas 5 e 6.	11
2.4	Análise do comportamento das ordens pendentes ao longo do período de estudo com os dados fornecidos pelas empresas 7 e 8.	11
2.5	Análise do comportamento das ordens pendentes ao longo do período de estudo com os dados fornecidos pelas empresas 9 e 10.	12
2.6	Análise do comportamento das ordens pendentes ao longo do período de estudo com os dados fornecidos pelas empresas 11 e 12.	12
4.1	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período em estudo na solução do modelo M1.1.	19
4.2	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo da solução após melhoramento com pesquisa local (modelo M1.2).	20
4.3	Análise do comportamento das ordens resolvidas de instalação ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.1.	22
4.4	Análise do comportamento das ordens resolvidas de instalação ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3.	23
4.5	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3.	23
4.6	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução heurística H1.	28
4.7	Comparação entre o valor médio do número total de avarias semanais e o número de avarias simuladas em três cenários distintos com o modelo M1.3.	31
4.8	Análise das ordens pendentes de manutenção de todas as empresas no caso de se considerar o valor médio de avarias e nos três cenários simulados na solução do modelo M1.3.	31
4.9	Comparação entre valor médio do número total de avarias semanais e o número de avarias simuladas em três cenários distintos com a heurística H1.	33

4.10	Análise das ordens pendentes de manutenção de todas as empresas no caso de se considerar o valor médio de avarias e nos três cenários simulados na solução da heurística H1.	33
4.11	Análise das ordens pendentes de manutenção de todas as empresas nas últimas semanas do período de estudo nos três cenários simulados da heurística H1.	34
5.1	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2, com $k = 1$	38
5.2	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2, com $k = 4$	39
5.3	Comparação entre o número de equipas e o número de ordens pendentes de manutenção no fim do período de estudo para os vários valores de k	41
5.4	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução heurística H2, com $k = 1$	42
5.5	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução heurística H2, com $k = 4$	43
5.6	Comparação entre o valor médio do total das avarias semanais e o número de avarias simuladas em três cenários distintos com o modelo M2 considerando $k = 1$	45
5.7	Análise das ordens pendentes de manutenção de todas as empresas no caso de se considerar o valor médio de avarias e nos três cenários simulados na solução do modelo M2 considerando $k = 1$	45
5.8	Comparação entre o valor médio do total de avarias semanais e o número de avarias simuladas em três cenários distintos com a heurística H2 considerando $k = 1$	46
5.9	Análise das ordens pendentes de manutenção de todas as empresas no caso de se considerar o valor médio de avarias e nos três cenários simulados na solução heurística H2 considerando $k = 1$	47
5.10	Análise das ordens pendentes de manutenção de todas as empresas nas últimas semanas do período de estudo nos três cenários simulados da solução heurística H2 considerando $k = 1$	47
B.1	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 1.	59
B.2	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 2.	60
B.3	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 3.	60
B.4	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 4.	60
B.5	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 5.	60
B.6	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 6.	61

B.7	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 7.	61
B.8	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 8.	61
B.9	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 9.	61
B.10	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 10.	62
B.11	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 11.	62
B.12	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 12.	62
C.1	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 1.	63
C.2	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 2.	64
C.3	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 3.	64
C.4	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 4.	64
C.5	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 5.	64
C.6	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 6.	65
C.7	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 7.	65
C.8	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 8.	65
C.9	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 9.	65
C.10	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 10.	66
C.11	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 11.	66
C.12	Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 12.	66

Lista de Tabelas

2.1	Dados do problema para cada empresa extraídos do <i>Excel</i> relativos ao final do ano 2018.	9
2.2	Dados comuns a todas as empresas do problema extraídos do <i>Excel</i> .	9
2.3	Fração de equipas alocadas atualmente para cada tarefa e respetivo número de equipas por empresa.	10
4.1	Número de variáveis do problema.	18
4.2	Valores do parâmetro ℓ_p para cada empresa p obtidos com a solução encontrada com o modelo M1.1.	20
4.3	Comparação entre a solução encontrada com o modelo M1.2 e a situação atual praticada pela empresa.	21
4.4	Análise das diferenças entre as melhores soluções encontradas pelos modelos M1.1 e M1.3 para cada empresa.	24
4.5	Valores obtidos no CPLEX para as melhores soluções encontradas pelos modelos M1.1 e M1.3.	25
4.6	Comparação entre as soluções encontradas pelos modelo M1.2 e M1.3 com a situação atual praticada pela empresa.	25
4.7	Comparação entre as soluções do modelo M1.3 e da heurística H1 e a situação atual praticada pela empresa.	29
4.8	Comparação entre a média de avarias, o número de ordens pendentes de manutenção e a percentagem de equipas sem trabalhar ao longo do período de estudo quando utilizada a solução do modelo M1.3 no caso do valor médio e nos três cenários gerados aleatoriamente.	32
4.9	Comparação entre a média de avarias, o número de ordens pendentes de manutenção e a percentagem de equipas sem trabalhar ao longo do período de estudo quando utilizada a solução heurística H1 no caso do valor médio e nos três cenários gerados aleatoriamente.	34
5.1	Comparação entre as soluções do modelo M2 para $k = 1$ e $k = 4$ e a situação atual praticada pela empresa.	40
5.2	Comparação entre as soluções da heurística H2 para valores de $k = 1$ e $k = 4$ e a situação atual praticada pela empresa.	44

-
- 5.3 Comparação entre a média de avarias, o número de ordens pendentes de manutenção e a percentagem de equipas sem trabalhar ao longo do período de estudo quando utilizada a solução do modelo M2 com $k = 1$ no caso do valor médio e nos três cenários gerados aleatoriamente. 46
- 5.4 Comparação entre a média de avarias, o número de ordens pendentes de manutenção e a percentagem de equipas sem trabalhar ao longo do período de estudo quando utilizada a solução heurística H2 com $k = 1$ no caso do valor médio e nos três cenários gerados aleatoriamente. 48

Capítulo 1

Introdução

O trabalho aqui apresentado enquadra-se num contexto empresarial, no qual é inquestionável a relevância da matemática. Isto ocorre, devido à quantidade de dados informatizados existente nas empresas e na busca da procura de soluções que otimizem os resultados nas mesmas. Neste sentido, parte da dissertação decorreu em paralelo com um estágio curricular na EDP Distribuição.

A EDP Distribuição é a empresa que, em território continental, exerce a atividade de operador de rede de distribuição, regulada pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. Atualmente, é titular da maioria das concessões municipais de distribuição de energia elétrica em baixa tensão, bem como da concessão para a exploração da Rede Nacional de Distribuição de energia elétrica de média e alta tensão [5].

A distribuição de energia elétrica é o centro de atuação, sendo que serviços como ligações à rede elétrica, assistência técnica à rede e clientes, apoio na escolha de soluções energéticas eficientes e leitura de equipamentos de contagem são prestados pela empresa.

Como em todas as empresas de grandes dimensões, existem vários departamentos que visam conseguir uma melhor organização. O departamento no qual foi inserido o estágio designa-se por Direção de Operações Inovgrid (DOI). As principais atribuições da DOI são:

- assegurar a implementação das redes inteligentes, a gestão dos ativos de medição, as operações e serviços associados, garantindo a adequada recolha e disponibilização dos dados dos consumos;
- assegurar a gestão dos ativos de medição de energia da empresa e garantir a transição para uma plataforma de redes inteligentes;
- promover a integração das funcionalidades da tecnologia nos processos de negócio da empresa;
- definir e operacionalizar os sistemas de gestão e operação da plataforma de redes inteligentes;
- assegurar a resposta da plataforma de redes inteligentes às solicitações dos diversos stakeholders.

InovGrid é um projeto inovador criado pela EDP que permite melhorar a informação da rede elétrica e fornece equipamentos inteligentes capazes de automatizar a gestão da energia, possibilitando uma melhor qualidade do serviço, como por exemplo, a diminuição dos custos e um aumento da eficiência energética e da sustentabilidade ambiental [3].

São estes projetos inovações que fazem com que constantemente existam planos de trabalho diferentes

e respostas a obter. O trabalho desenvolvido surgiu nesse contexto, da necessidade de dar resposta a um problema atual. Com a implementação de novos equipamentos a serem instalados, a necessidade de ajuste de equipas que tratam da instalação e manutenção dos aparelhos é notória, uma vez que existem mais tarefas a ser executadas. Atualmente, um dos ajustes mais necessário prende-se com o número de equipas que estão responsáveis pelos ativos de contagem dos Postos de Transformação de Distribuição (PTD). Neste contexto surge o problema a tratar, resolver o número de ordens pendentes nos PTD.

Para tratar o problema proposto foi necessário desenvolver modelos matemáticos para o representar, tendo-se optado por um programa linear inteiro misto para esse efeito. Para a resolução deste problema, foram utilizadas ferramentas matemáticas adquiridas durante a minha formação.

No decorrer do estágio foram realizadas as seguintes fases:

1. conhecimento da estrutura da empresa e respetivo departamento;
2. contextualização do problema na empresa;
3. recolha de dados reais na EDP Distribuição para posterior aplicação dos modelos;
4. pesquisa na literatura de problemas semelhantes ao proposto pela empresa;
5. criação do primeiro modelo linear inteiro misto;
6. obtenção de soluções do problema;
7. análise dos resultados obtidos;
8. reestruturação do modelo linear inteiro misto (segundo modelo);
9. obtenção de novas soluções com a reestruturação problema;
10. análise dos novos resultados obtidos;
11. desenvolvimento de soluções heurísticas (caso a empresa não adquira um software de otimização);
12. construção de um simulador para avaliar o desempenho em cenários realistas;
13. análise da situação atual implementada na empresa;
14. comparação das várias soluções.

No primeiro e no segundo pontos, deparei-me com um vasto conjunto de informações existente da empresa, inclusive a forma de perceber como tudo é organizado e processado. No entanto, a possibilidade de visita a diferentes PTD fez com que houvesse uma melhor facilidade na perceção do funcionamento dos mesmos.

Os pontos dois, três e treze são abordados no Capítulo 2 nos quais se pretende dar a conhecer melhor a organização da empresa relativamente ao problema em questão, recolher os dados necessários para o resolver e perceber a atual situação.

O ponto quatro, relativo ao estado de arte, trata de literatura com problemas similares, não tendo

encontrado nenhum modelo que foque todas as características do problema proposto. No entanto, existem trabalhos na literatura que descrevem partes do problema em estudo e estes são reportados no Capítulo 3.

Os três itens seguintes estão tratados no Capítulo 4. Inicialmente apresenta-se o modelo linear inteiro misto com a respetiva descrição da função objetivo e restrições. De seguida, através do software CPLEX, resolve-se o modelo inicial. Dada a natureza combinatória do problema, a solução ótima nem sempre é encontrada, sendo necessário fazer relaxações no modelo de forma a encontrar soluções¹ que se ajustem aos condicionantes da empresa. Além da solução obtida pelo CPLEX, ainda se obtém uma outra considerada a partir de uma heurística (ponto onze). Esta última solução surge na medida que nem sempre é possível ter acesso a um software de otimização.

Na maioria das situações, quando analisada uma solução encontrada pelo modelo inicial, constata-se que este pode ser reestruturado de forma a torná-lo mais eficiente. Nesta sequência, alterou-se a função objetivo e acrescentou-se uma nova restrição de forma a ter um novo modelo que continue a satisfazer as necessidades da empresa. Para este modelo, os procedimentos efetuados encontram-se nos pontos oito, nove e dez (análogos aos pontos cinco, seis e sete) descritos no Capítulo 5 juntamente com uma nova solução heurística para o problema (ponto onze).

Os modelos teóricos têm parâmetros que se podem afastar do valor previsto, quando aplicadas as soluções no nosso quotidiano. Nesse sentido, as soluções apresentadas são consideradas simulações para valores diferentes dos esperados (ponto doze). O intuito principal é averiguar a eficiência das mesmas quando aplicadas pela empresa num cenário realista.

Por fim, salienta-se que para todas as soluções encontradas se compara com a situação atual, permitindo perceber as vantagens das primeiras (ponto catorze).

¹Note-se que em cada solução obtida se desenvolveu um procedimento automático para sumariar a informação relevante da mesma, encontrando-se guardada num ficheiro *Excel*.

Para a EDP Distribuição os ficheiros com as soluções não se consideram de acesso público, sendo estes apenas acessíveis quando solicitados com a garantia da confidencialidade ser mantida.

Capítulo 2

EDP Distribuição e os postos de transformação de distribuição

2.1 Introdução

A energia elétrica que chega até nós todos os dias passa por um longo caminho até se encontrar ao nosso dispor. O percurso desde os centros produtores até aos clientes é feito através da rede de transporte e a rede de distribuição, sendo a última operada pela EDP Distribuição.

De forma a garantir os necessários níveis de qualidade e minimizar as perdas nas redes, a rede de distribuição é constituída por linhas aéreas e cabos subterrâneos de alta, média e baixa tensão.

Um das infraestruturas fundamentais da rede de distribuição são os PTD, sendo nestes postos que se procede à transformação da energia elétrica de média tensão para a baixa tensão, alimentando a rede de distribuição de baixa tensão como ilustra a Figura 2.1.

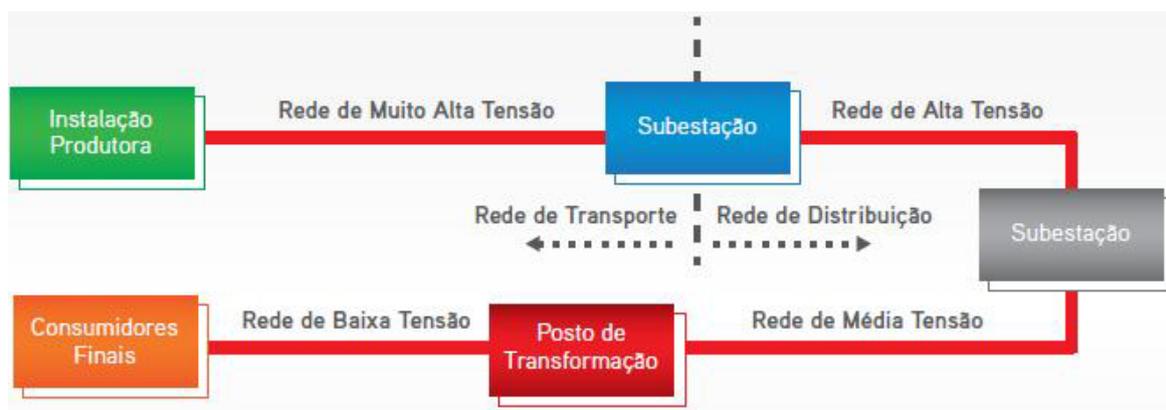


Fig. 2.1 Fluxo energético desde a produção até ao consumidor.

Os PTD podem ser divididos em dois tipos: os aéreos e em cabine. No primeiro tipo, os PTD estão ligados na rede aérea em média tensão, sendo o transformador instalado num apoio da linha de distribuição média tensão e o quadro geral de baixa tensão na base desse apoio, num armário dimensionado para o efeito. No segundo tipo, todos os aparelhos dos PTD estão instalados dentro de uma cabine que pode assumir uma das seguintes variantes: cabine alta (torre), cabine baixa em edifício próprio, cabine baixa integrada em edifício, cabine pré-fabricada (monobloco) e ainda cabine

subterrânea [6]. Os PTD têm equipamentos de contagem em comum, dos quais alguns podem estar em fase de instalação e outros com necessidade de reparação, surgindo nesses casos ordens pendentes para resolver.

Salienta-se que os equipamentos existentes nos PTD não pertencem às empresas que efetuam as tarefas de manutenção e instalação, mas sim às respetivas zonas geográficas de intervenção.

2.2 Contextualização do problema na empresa

O trabalho proposto durante o estágio curricular visava encontrar um modelo que resolva as ordens pendentes que ocorrem nos PTD, isto é, trabalhos que precisam de ser efetuados. Dentro das ordens pendentes existentes, podemos classificá-las em duas formas distintas:

- Ordens pendentes de manutenção, as quais estão relacionadas com avarias dos equipamentos. O objetivo é tratar estas ordens de forma a que os aparelhos estejam em condições de funcionamento.
- Ordens pendentes de instalação, relacionadas com a aplicação de novos equipamentos. A constante necessidade de novos modelos de geração de energia e de maior fiabilidade e qualidade do fornecimento aos clientes, faz com que seja imprescindível a instalação de novos equipamentos para esse maior ajuste.

Para o problema em questão, em cada PTD existem três equipamentos de contagem distintos com ordens pendentes relativas à manutenção e dois equipamentos de contagem com ordens pendentes de instalação. Pode dar-se o caso do mesmo tipo de equipamento estar associado apenas a um tipo de ordens pendentes ou aos dois tipos. Se um aparelho está associado apenas a ordens pendentes do tipo manutenção, significa que os aparelhos em causa já foram todos instalados, enquanto se estiver associado apenas a ordens pendentes de instalação, significa que não está associado a nenhuma taxa de avaria. Contudo, alguns aparelhos podem estar associados aos dois tipos de ordens. Nesse caso, é necessário realizar a sua instalação, existindo uma taxa de avaria associado ao mesmo, sendo necessário efetuar posteriormente a manutenção quando existem avarias.

Assim, considera-se no contexto do modelo as seguintes tarefas¹: mA, mB, mC, insC e insD, onde as três primeiras são ordens pendentes de manutenção de três equipamentos distintos e as duas últimas tarefas são relativas a ordens pendentes de instalação de aparelhos distintos. Salienta-se que a tarefa insC trata o mesmo equipamento que a tarefa mC.

Apresentados os diferentes equipamentos de contagem com ordens pendentes, falta saber de que forma se podem resolver essas ordens pendentes. As tarefas para resolução de ordens pendentes estão delegadas a empresas subcontratadas pela EDP Distribuição, que tendo um contrato de empreitada contínua com cada uma delas, ficam responsáveis por executar as tarefas dos PTD de determinadas zonas geográficas. No total existem 12 empresas com as zonas geográficas que perfazem Portugal Continental, e serão estas empresas que se irá ter em conta para a divisão do modelo a desenvolver. Para salvaguardar os dados da EDP Distribuição, uma vez que estão analisados dados reais, o nome

¹Para salvaguarda dos dados da EDP Distribuição, os nomes dos equipamentos não são mencionados, uma vez que se irá trabalhar com valores reais.

de cada empresa não é mencionado, sendo designadas por Empresa i , $i = 1, \dots, 12$.

Cada empresa necessita de equipas para tratar as tarefas, e portanto é necessário responder às seguintes perguntas: Quantas equipas são necessárias para tratar as ordens pendentes existentes? E sabendo o número de equipas, qual é a fração de equipas que fica responsável para cada tarefa? Estas são questões às quais o modelo desenvolvido pretende responder. No entanto, inicialmente é necessário ter mais informação por parte de cada empresa, como o tempo que cada empresa demora a executar as diversas tarefas e o número de ordens pendentes em cada tarefa no instante inicial.

Posto isto, o modelo também necessita de ter definido um período de tempo no qual se pretende resolver as ordens pendentes, o tempo disponível de cada equipa (inferior ao anterior) e o número de horas laborais por semana de cada empresa. Para períodos maiores de tempo, considera-se a semana como unidade de tempo.

Assim, durante o período de tempo em que se pretende resolver o número de ordens pendentes, é necessário ainda considerar as novas ordens pendentes que aparecem, resultantes de avarias, dos equipamentos com tarefas de manutenção. Deste modo, é necessário saber o número total de equipamentos instalados e a respetiva taxa de avaria.

Na estrutura do modelo inicial, considera-se apenas que se quer minimizar o número de ordens pendentes das tarefas de manutenção. Contudo, as ordens pendentes de instalação têm de ser obrigatoriamente satisfeitas, uma vez que a EDP Distribuição tem um plano de instalação que precisa de cumprir. Essas instalações deverão ser feitas de forma mais ou menos uniforme ao longo do tempo do estudo. Deste modo, essas ordens são colocadas como uma restrição do problema.

2.3 Descrição do problema

À medida que o projeto Inovgrid e a telecontagem² se propaga pelas várias regiões do país, torna-se mais crítico gerir de forma mais ágil e precisa a atividade das empresas responsáveis por cada área geográfica, designadamente o número de equipas disponíveis e a sua alocação para fazer face às novas necessidades. Deste modo, existe atualmente uma acumulação de ordens pendentes que advém do crescimento significativo de ativos instalados, equipamentos avariados e do facto de os procedimentos de controlo estarem em fase de transição. É neste contexto que surge a necessidade de criar um modelo, com o intuito de desenvolver de forma dinâmica esta gestão.

Admite-se que cada equipa tem de trabalhar durante um período fixo de tempo e o número de ordens pendentes é um valor inteiro.

Para modelar o problema, começa-se por definir os parâmetros e as variáveis utilizadas. Considere-se o conjunto de empresas $P = \{\text{Empresa } 1, \dots, \text{Empresa } 12\}$, o conjunto de tarefas $T_{m+ins} = \{mA, mB, mC, insC, insD\}$, os subconjuntos $T_m = \{mA, mB, mC\}$ e $T_{ins} = \{insC, insD\}$ referentes às ordens de manutenção e instalação, respetivamente.

Parâmetros

$D \equiv$ Duração, em semanas, do período de tempo em estudo. Denote-se por $N = \{1, \dots, D\}$.

²Forma digital de contagem do consumo de energia a partir de contadores inteligentes, permitindo leituras automáticas, faturas sem estimativas e possibilidade de operações remotas.

$d \equiv$ Duração, em semanas, do período de trabalho que cada equipa está disponível. Assume-se como constante e independente de cada empresa, sendo $d \leq D$. O modelo aceita, se necessário valores diferentes (mas fixos) por empresa.

$erro_t \equiv$ Variação máxima permitida do número de instalações semanais para cada tarefa t , $t \in T_{ins}$.

$m_p \equiv$ Número máximo de equipas disponíveis semanalmente na empresa p , $p \in P$.

$M \equiv$ Número máximo de equipas disponíveis semanalmente em todas as empresas.

$tempo_{t,p} \equiv$ Tempo, em horas, da execução da tarefa t que a empresa p demora, $t \in T_{m+ins}$, $p \in P$.

$total_{t,p} \equiv$ Número total de equipamentos associados à tarefa t existentes nos postos de transformação de distribuição por cada empresa p , $t \in \{mA, mB\}$, $p \in P$.

$total_{mC,p}^0 \equiv$ Número total de equipamentos³ associados à tarefa mC existentes nos postos de transformação de distribuição por cada empresa p , $p \in P$.

$taxa_avaria_t \equiv$ Taxa de avaria dos equipamentos da tarefa t , $t \in T_m$.

$T^n \equiv$ Número de horas laborais⁴ na semana n , $n \in N$. Assume-se que é independente por cada empresa. Contudo, o modelo aceita, se necessário, valores diferentes (mas fixos) por empresa.

$x_{t,p}^0 \equiv$ Número de ordens pendentes no instante inicial da tarefa t na empresa p , $t \in T_{m+ins}$, $p \in P$.

Variáveis de decisão

$c_p^n \equiv$ Número de novas equipas disponíveis na semana n na empresa p , $n \in \{1, \dots, D-d+1\}$, $p \in P$.

$f_{t,p}^n \equiv$ Fração de equipas da empresa p a trabalhar na semana n e na tarefa t , $n \in N$, $t \in T_{m+ins}$, $p \in P$.

2.4 Dados reais do problema

De forma a testar os modelos, é necessário fazer corresponder valores aos parâmetros anteriores. Desse modo, são utilizados dados relativos ao final do ano 2018 da EDP Distribuição para obter soluções. O intuito é obter soluções que permitam reduzir o número de ordens pendentes durante o ano corrente 2019 ($D = 52$), sendo que cada equipa deverá estar disponível durante seis meses ($d = 26$). Segue-se a Tabela 2.1 com os dados do problema para cada empresa.

³Este parâmetro, $total_{mC,p}^0$, difere do parâmetro anterior, $total_{t,p}$ porque os equipamentos mC ainda se encontram em fase de instalação, sendo necessário atualizar estes valores iniciais semanalmente, enquanto que os outros equipamentos já sofreram as instalações todas.

⁴Este parâmetro depende de n , devido à existência de feriados e datas comemorativas em algumas semanas, fazendo com que o número de horas laborais se altere.

	Empresa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tempo de execução de cada tarefa	tempo_mA	1,00	1,33	1,00	1,33	1,33	1,60	1,60	1,00	1,33	2,00	1,00	1,00
	tempo_mB	1,00	1,00	1,14	1,33	1,33	1,60	1,33	2,00	1,33	2,00	1,00	1,00
	tempo_mC	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,60	1,33	0,67	4,00	4,00	1,00	1,33
	tempo_insC	1,14	4,00	2,00	2,00	2,00	2,67	2,00	1,33	2,00	4,00	2,00	4,00
	tempo_insD	1,00	1,00	1,14	1,33	1,00	1,33	1,00	0,67	1,00	2,00	1,00	1,00
Ordens pendentes no instante inicial	x^0_mA	151	77	376	739	422	88	86	26	238	1096	20	299
	x^0_mB	50	78	767	1158	1646	1103	270	14	41	65	60	70
	x^0_mC	188	12	13	22	40	34	72	111	36	76	15	3
	x^0_insC	416	164	152	320	369	149	428	133	233	172	287	268
	x^0_insD	1870	451	1489	2411	2666	618	4246	401	294	875	2801	1909
Total de equipamentos existentes	total_mA	6872	3043	4095	7890	8885	4294	7673	2475	4775	5777	5920	6280
	total_mB	8435	3649	4492	8214	8899	4473	7840	2204	4898	3472	6285	4904
	total_mC	4293	830	667	1672	1321	830	1899	1818	1057	1058	1710	972
Máximo de equipas	m	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Tabela 2.1 Dados do problema para cada empresa extraídos do *Excel* relativos ao final do ano 2018.

A tabela foi extraída do *Excel*, uma vez que é este editor de planilhas que fornece a informação necessária para posteriormente correr o programa de forma a encontrar a solução pretendida, estando acessível para qualquer utilizador. De notar que os valores considerados podem ser discrepantes de empresa para empresa, uma vez que estão alocadas a zonas geográficas distintas. Os tempos de execução também diferem entre cada empresa, pois as áreas das diversas zonas geográficas são distintas. Em relação ao número de ordens pendentes de cada tarefa no instante inicial, também surgem bastantes oscilações, uma vez que existem fatores externos que poderão ter influência nestes valores. Já no caso do total de equipamentos existentes instalados, as diferenças de valores explicam-se por haver determinadas zonas geográficas com mais postos de transformação de distribuição que outras, dependendo do número de habitantes. O último parâmetro da tabela é independente das empresas, uma vez que não existe informação rigorosa por parte da EDP Distribuição sobre este valor. Futuramente, a EDP Distribuição poderá rever este parâmetro, considerando valores diferentes para cada empresa. A Tabela 2.2 também foi extraída da mesma ferramenta que a anterior, mas agora os dados são invariantes para cada empresa.

Taxa de avaria do equipamento	taxa_mA	0,0012
	taxa_mB	0,0029
	taxa_mC	0,0082
Horas disponíveis semanais a trabalhar	T	40
Duração de contratos de trabalho	d	26
Período em estudo	D	52
Margem de erro	erro_insC	0,4
	erro_insD	0,2
Máximo de equipas	M	120

Tabela 2.2 Dados comuns a todas as empresas do problema extraídos do *Excel*.

Os valores para os parâmetros da taxa de avaria do equipamento têm por base algum histórico existente da EDP Distribuição. Já os valores dos parâmetros *erro_insC* e *erro_insD* foram considerados tendo em conta o número de equipamentos a instalar da respetiva tarefa no instante inicial.

Observando pormenorizadamente, a Tabela 2.2, nota-se que *T* não está mencionado nos parâmetros.

No entanto, T é um valor de referência para T^n e trata o número de horas laborais caso não existam feriados e/ou datas comemorativas durante os cinco dias úteis da semana, os quais são considerados em T^n . A tabela na qual constam estes últimos valores não é apresentada devido às suas dimensões.

2.5 Situação atual

Os dados relativos ao tempo de execução de cada tarefa apresentados anteriormente foram obtidos questionando cada empresa, de forma a conseguir obter um modelo coerente. O mesmo sucedeu com os próximos dados. Para uma melhor perceção do trabalho desenvolvido, foi facultada pelas empresas informação relativa à distribuição atual das equipas e respetivas frações (Tabela 2.3). Assim, será possível comparar as soluções encontradas com a situação atual.

Empresa	mA	mB	mC	insC	insD	Equipas
1	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*	*
3	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	6
4	3.80	3.80	3.80	3.80	3.80	19
5	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	2
6	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	2
7	2.00	2.00	0.50	0.50	2.00	7
8	0.50	0.50	0.33	0.33	0.33	2
9	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	4
10	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	8
11	4.00	4.00	2.00	3.00	4.00	17
12	2.00	2.00	1.50	1.50	2.00	9

* A aguardar informação da respetiva empresa.

Tabela 2.3 Fração de equipas alocadas atualmente para cada tarefa e respetivo número de equipas por empresa.

Os dados apresentados são fixos durante todo o tempo do estudo. Esta situação é pouco flexível, apresentando desvantagens ao nível da otimização quando comparada às soluções a serem encontradas pelos modelos desenvolvidos, as quais serão dinâmicas e ajustadas aos valores, consoante as necessidades em cada período. Posteriormente, após a obtenção das novas soluções, poder-se-á testar a afirmação anterior.

Até ao término do trabalho não foi possível obter os dados relativos às empresas 1 e 2, motivo pelo qual não serão apresentados no decorrer do trabalho desenvolvido.

2.5.1 Avaliação da situação atual

De seguida, testa-se a eficiência da situação atual a partir dos dados anteriores. Para tal, considera-se o número de ordens pedentes no instante inicial e as que vão surgindo ao longo do período de tempo (provenientes das avarias) para as de manutenção. Desta forma, é possível avaliar a situação atual. Note-se que é necessário impor restrições para se obter os resultados seguintes. No entanto, estas

são expostas no Capítulo 4 conseguindo, numa primeira fase, apenas averiguar a qualidade a atual situação.

Nos próximos gráficos observam-se os resultados a obter ao longo de 2019, em cada empresa, caso se mantenha o procedimento até agora utilizado na EDP Distribuição.

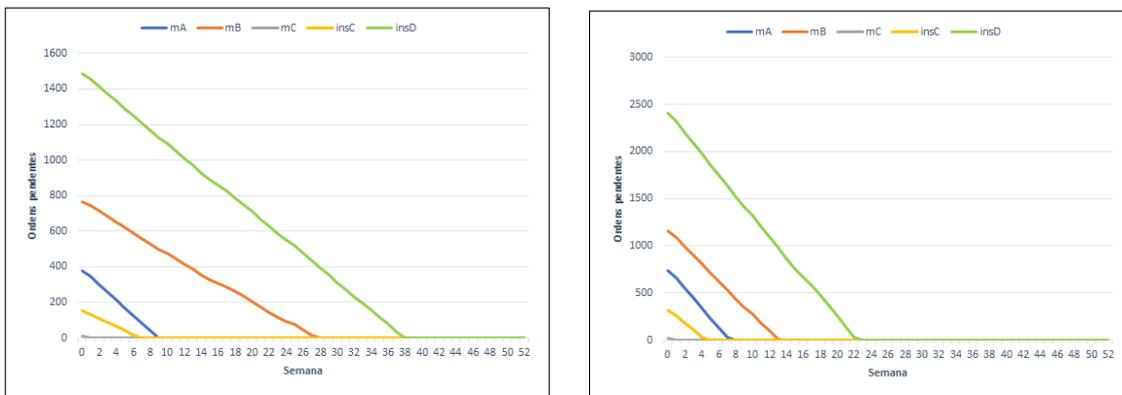


Fig. 2.2 Análise do comportamento das ordens pendentes ao longo do período de estudo com os dados fornecidos pelas empresas 3 e 4.

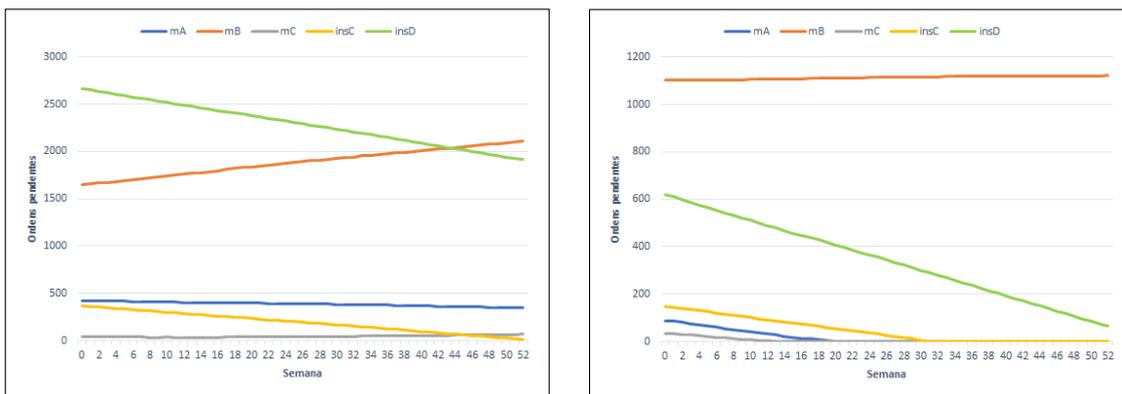


Fig. 2.3 Análise do comportamento das ordens pendentes ao longo do período de estudo com os dados fornecidos pelas empresas 5 e 6.

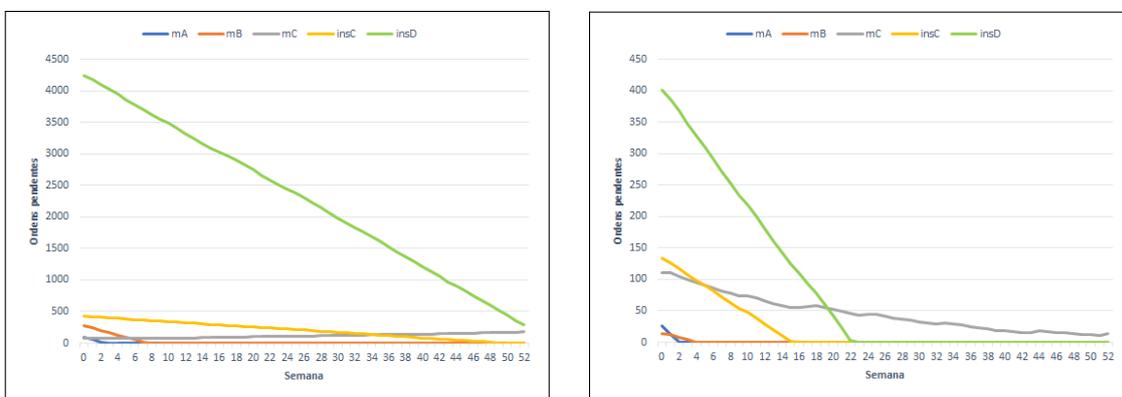


Fig. 2.4 Análise do comportamento das ordens pendentes ao longo do período de estudo com os dados fornecidos pelas empresas 7 e 8.

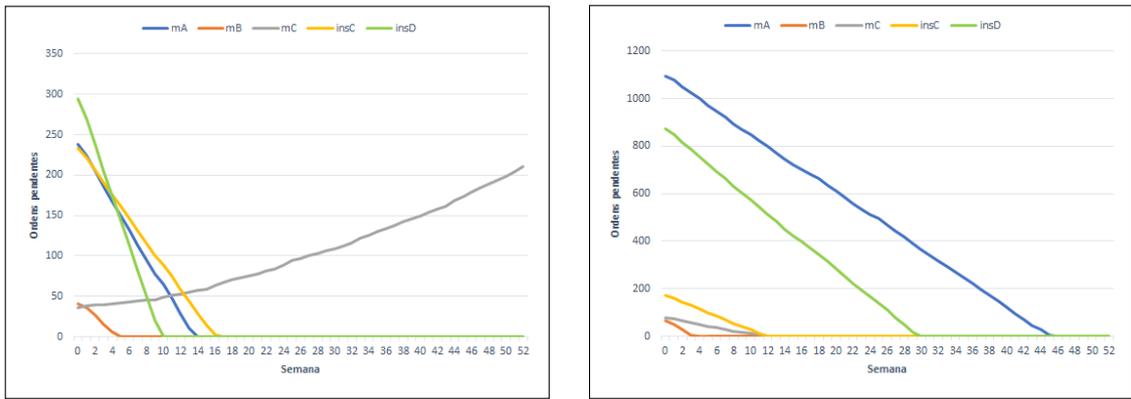


Fig. 2.5 Análise do comportamento das ordens pendentes ao longo do período de estudo com os dados fornecidos pelas empresas 9 e 10.

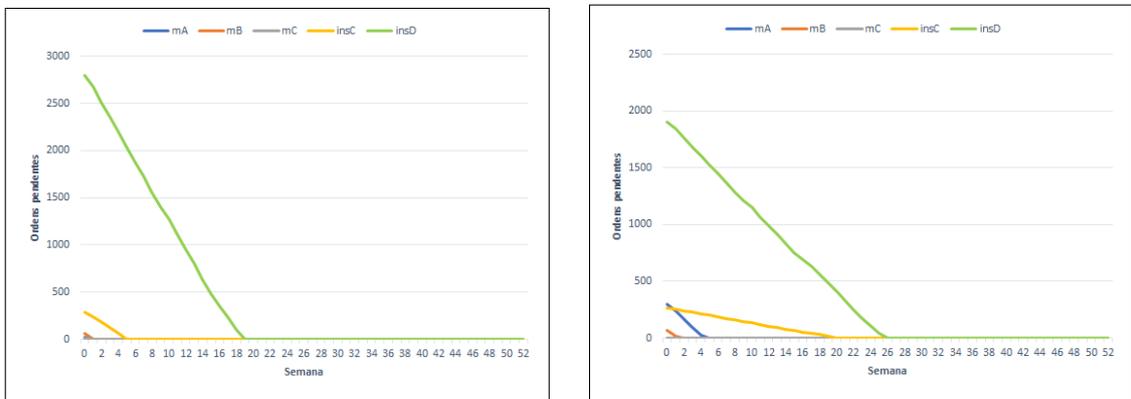


Fig. 2.6 Análise do comportamento das ordens pendentes ao longo do período de estudo com os dados fornecidos pelas empresas 11 e 12.

Analisando o comportamento das ordens pendentes em cada empresa, cerca de metade (empresas 5, 6, 7, 8 e 9) não conseguirão resolver todas as ordens pendentes, até ao final de 2019, da forma como estão alocadas as equipas. Surge assim a necessidade de obter um modelo para contrariar estes resultados, podendo agora as alocações de equipas por tarefa serem efetuadas de forma mais dinâmica. No desenrolar do trabalho será possível perceber o que leva aos comportamentos observados. Se a incorreta alocação de equipas por tarefa ou a falta de equipas nestas empresas.

Capítulo 3

Estado de Arte

O objetivo principal do trabalho é encontrar uma solução para o problema referido no Capítulo 2. Nesse sentido, pretende-se determinar o menor número de equipas a trabalhar para cada empresa, com alocação de equipas distribuídas em cada tarefa de forma a que no final do período de estudo seja possível reduzir o número de ordens pendentes de manutenção e se executem todas as ordens pendentes relativas às instalações.

A análise dos problemas de *planeamento de produção* [1, 2, 12] pode dar um contributo para a resolução desta situação. Contudo, na literatura disponível não se conseguiu encontrar um modelo que descreva todos os aspetos do problema que se pretende resolver. Nesta secção ir-se-á referir alguns modelos que descrevem parte do problema original e as incompatibilidades relativamente ao problema em questão.

Quando o número de equipas é fixo, surge na literatura o *planeamento de produção* geralmente associado ao planeamento das atividades de produção (neste caso, como são alocadas as equipas em cada tarefa semanalmente), atendendo às necessidades do cliente de forma mais eficiente e/ou económica. No entanto, esta formulação não é apropriada para esta problemática, uma vez que o número de equipas não é um parâmetro de entrada mas sim uma variável do problema.

Alguns trabalhos associam ainda o problema à gestão de estoque, como em [11], sendo que o objetivo é minimizar o custo do produto e de manutenção do estoque ao longo do período de planeamento, ou como em [4], onde minimiza a soma dos custos de compra, retenção de estoque e desmontagem. Na situação proposta pela EDP Distribuição não se considera a possibilidade de estoque, não fazendo sentido ter ordens resolvidas excedentes às existentes. Ainda em [4], considera-se maximizar o nível de serviço que, no caso da EDP Distribuição poderá ser equivalente a maximizar o número de equipas a trabalhar dentro das equipas disponíveis, como se verá posteriormente.

Por vezes o *planeamento de produção* surge associado também a trabalho por turnos [7, 9]. Este trabalho realizado por turnos pode ser aplicável neste contexto, considerando neste caso que os turnos são relativos ao tempo disponível de cada equipa.

Por outro lado, o problema de minimizar o número de equipas para atingir uma certa produção fixa também está descrito na literatura. O modelo de planeamento multi-período apresentado em [10] é um destes exemplos. Neste último, o objetivo é determinar a melhor distribuição de carga da central elétrica e dos combustíveis, de forma a manter a eletricidade na rede, para determinada redução de CO_2 (limites fixos). Mais uma vez, este modelo não é o mais adequado para o problema a tratar uma

vez que ao longo do período de tempo em estudo se considerar que surgem novas ordens para resolver, relacionadas com as avarias dos equipamentos em análise. Assim, para além de se resolverem as ordens pendentes existentes no instante inicial, é necessário considerar o número de novas ordens pendentes que surgem relativas às tarefas de manutenção. Ainda, o número de ordens pendentes depende das ordens resolvidas nos instantes anteriores, pelo que, não podem ser consideradas fixas para o problema.

Capítulo 4

Modelo 1: minimização número de ordens pendentes de manutenção

A principal motivação para a formulação do modelo apresentado neste capítulo deve-se ao elevado número de ordens pendentes verificado na EDP Distribuição. As ordens pendentes afetam a qualidade de serviço prestado, impossibilitando as leituras obtidas dos respetivos equipamentos. Neste sentido, um dos principais objetivos propostos no decorrer do estágio foi desenvolver um modelo que permita minimizar o número de ordens pendentes de manutenção e resolver as ordens pendentes de instalação com um limite sobre o número de equipas disponíveis.

Variáveis auxiliares

De forma a facilitar a descrição das variáveis de decisão no modelo consideraram-se as variáveis auxiliares. Estas são calculadas a partir das primeiras. Deste modo, obtendo os valores das variáveis de decisão, os valores das variáveis auxiliares são facilmente calculáveis. De seguida, apresentam-se as variáveis auxiliares a considerar no problema.

$a_{t,p}^n$ \equiv Número de avarias na semana n dos equipamentos associados à tarefa t executada pela empresa p , $n \in N$, $t \in T_m$, $p \in P$. Este número de avarias terá como consequência o aumento do número de ordens pendentes correspondentes.

e_p^n \equiv Número de equipas disponíveis na semana n na empresa p , $n \in N$, $p \in P$.

$r_{t,p}^n$ \equiv Número de ordens pendentes resolvidas na semana n associados à tarefa t executadas pela empresa p , $n \in N$, $t \in T$, $p \in P$. Este número de ordens resolvidas terá como consequência a diminuição do número de ordens pendentes correspondentes.

$total_{mC,p}^n$ \equiv Número de total de equipamentos existente instalados da tarefa mC na semana n da empresa p , $n \in N$, $p \in P$.

$x_{t,p}^n$ \equiv Número de ordens pendentes de manutenção na semana n da tarefa t para cada empresa p , $n \in N$, $t \in T_m$, $p \in P$.

4.1 Modelo M1

De seguida, apresenta-se o modelo M1 inicialmente desenvolvido, no qual, para simplificação da notação, as tarefas serão denotadas pelos números 1 a 5 pela ordem indicada em T_{m+ins} .

$$\min \sum_{p=1}^{12} \sum_{t=1}^3 x_{t,p}^D \quad (1)$$

$$\text{s.a } e_p^n = \sum_{l=1}^n c_p^l, \quad n = 1, \dots, d \quad p \in P \quad (2)$$

$$e_p^n = \sum_{l=n-d}^n c_p^l, \quad n = d+1, \dots, D \quad p \in P \quad (3)$$

$$\sum_{t=1}^5 f_{t,p}^n = e_p^n, \quad n \in N, \quad p \in P \quad (4)$$

$$e_p^n \leq m_p, \quad n \in N, \quad p \in P \quad (5)$$

$$\sum_{p=1}^{12} e_p^n \leq M, \quad n \in N \quad (6)$$

$$x_{t,p}^n = x_{t,p}^{n-1} + a_{t,p}^n - r_{t,p}^n, \quad t \in T_m, \quad n \in N, \quad p \in P \quad (7)$$

$$a_{t,p}^n \leq 0.5 + \text{taxa_avar}ia_t(\text{total}_{t,p}^n - x_{t,p}^{n-1}), \quad t = 1, 2, \quad n \in N, \quad p \in P \quad (8)$$

$$a_{t,p}^n \geq -0.5 + \text{taxa_avar}ia_t(\text{total}_{t,p}^n - x_{t,p}^{n-1}), \quad t = 1, 2, \quad n \in N, \quad p \in P \quad (9)$$

$$a_{3,p}^n \leq 0.5 + \text{taxa_avar}ia_3(\text{total}_{mC,p}^n - x_{3,p}^{n-1}), \quad n \in N, \quad p \in P \quad (10)$$

$$a_{3,p}^n \geq -0.5 + \text{taxa_avar}ia_3(\text{total}_{mC,p}^n - x_{3,p}^{n-1}), \quad n \in N, \quad p \in P \quad (11)$$

$$\text{total}_{mC,p}^n = \text{total}_{mC,p}^{n-1} + r_{4,p}^n, \quad n \in N, \quad p \in P \quad (12)$$

$$r_{t,p}^n \leq \frac{T^n}{\text{tempo}_{t,p}} \times f_{t,p}^n, \quad t \in T_{m+ins}, \quad n \in N, \quad p \in P \quad (13)$$

$$r_{t,p}^n \geq -1 + \frac{T^n}{\text{tempo}_{t,p}} \times f_{t,p}^n, \quad t \in T_{m+ins}, \quad n \in N, \quad p \in P \quad (14)$$

$$(1 - \text{erro}_t) \times \frac{x_t^0}{D} \leq r_{t,p}^n, \quad t \in T_{ins}, \quad n \in N, \quad p \in P \quad (15)$$

$$(1 + \text{erro}_t) \times \frac{x_t^0}{D} \geq r_{t,p}^n, \quad t \in T_{ins}, \quad n \in N, \quad p \in P \quad (16)$$

$$\sum_{n=1}^D r_{t,p}^n = x_t^0, \quad t \in T_{ins}, \quad p \in P \quad (17)$$

$$c_p^n \in \mathbb{N}_0, \quad n = 1, \dots, D-d+1, \quad p \in P \quad (18)$$

$$f_{t,p}^n \geq 0, \quad n \in N, \quad t \in T_{m+ins}, \quad p \in P \quad (19)$$

$$a_{t,p}^n \in \mathbb{N}_0, \quad n \in N, \quad t \in T_m \quad p \in P \quad (20)$$

$$e_p^n \in \mathbb{N}_0, \quad n \in N, \quad p \in P \quad (21)$$

$$r_{t,p}^n \in \mathbb{N}_0, \quad n \in N, \quad t \in T_{m+ins}, \quad p \in P \quad (22)$$

$$\text{total}_{3,p}^n \in \mathbb{N}_0, \quad n \in N, \quad p \in P \quad (23)$$

$$x_{t,p}^n \in \mathbb{N}_0, \quad n \in N, \quad t \in T_m, \quad p \in P \quad (24)$$

Função objetivo

A expressão (1) indica que se pretende minimizar o número de ordens pendentes relativas às tarefas das manutenções no final do tempo de estudo (isto é, na semana D) para todas as empresas.

Restrições

As primeiras duas restrições, (2) e (3), permitem determinar o número de equipas disponíveis em cada empresa na semana n . O seu valor corresponde ao somatório das novas equipas disponíveis (c_p^n) nas d semanas anteriores, tendo em conta a duração das mesmas. Como cada nova equipa tem de estar disponível d semanas consecutivas, então a última semana na qual é possível alocar novas equipas é a semana $D - d + 1$.

O somatório das frações, $f_{t,p}^n$, deverá corresponder ao número de equipas disponíveis - restrição (4). Confrontando a restrições (5) e (6), ambas limitam o número de equipas disponíveis semanalmente. A primeira limita superiormente com o valor m_p o número de equipas em cada empresa e a segunda é uma restrição global que limita a soma de todas as equipas das empresas a M . Atendendo aos valores reportados nas Tabelas 2.1 e 2.2, para m_p e M , a restrição (6) é redundante e permite dividir o problema global em doze subproblemas independentes. Contudo, optou-se por não seguir esta estratégia uma vez que a EDP indicou que o valor de M poderia ser mais restritivo.

A restrição (7) indica como calcular as ordens pendentes da semana n juntando às ordens pendentes da semana anterior, $n - 1$, as avarias ocorridas durante a semana n e subtraindo o número de ordens resolvidas nessa mesma semana para cada tarefa de manutenção.

Uma vez que alguns dos equipamentos estão sujeitos a avarias, todas as semanas surgem novas ordens pendentes de manutenção, $a_{t,p}^n$, as quais são calculadas tendo em conta a taxa de avaria $taxa_avarial_t$ e o número total de equipamentos funcionais na semana anterior, $total_{t,p} - x_{t,p}^{n-1}$. Desse modo, as restrições (8) a (11) permitem encontrar o número inteiro $a_{t,p}^n$ mais próximo da previsão do número de avarias. A diferença entre (8)-(9) e (10)-(11) verifica-se no número total de equipamentos existentes, sendo as últimas dependentes de n devido às novas instalações efetuadas.

A restrição (12) permite atualizar o número de equipamentos instalados na semana n associados à tarefa mC , adicionando o valor existente na semana $n - 1$ ao valor de equipamentos instalados na semana n . Surge assim a ligação com as tarefas mC e $insC$.

O número de ordens resolvidas (manutenção ou instalação) na tarefa t está dependente do número de ordens que uma equipa consegue resolver, $\frac{T^n}{tempo_{t,p}}$, e da fração de equipas associada a essa tarefa, $f_{t,p}^n$. Desse modo, as restrições (13) e (14) permitem encontrar o número inteiro $r_{t,p}^n$ mais próximo de $\frac{T^n}{tempo_{t,p}} \times f_{t,p}^n$, sem o ultrapassar.

Em (15) a (17), mostra-se que as instalações devem ser feitas ao longo do tempo de estudo, aceitando uma discrepância relativamente ao valor médio dado pelo parâmetro $erro_{t,p}$.

Finalmente, nas últimas sete restrições, de (18) a (24), obtém-se o domínio das variáveis do problema. Todas as variáveis são inteiras não negativas com a exceção da variável $f_{t,p}^n$ que pode tomar valores não negativos mas não necessariamente inteiros.

4.1.1 Aplicação do modelo

Uma vez construído o modelo pretendido, segue-se a aplicação dos dados enunciados no Capítulo 2 no referido modelo. Para tal, recorre-se ao software CPLEX para resolver o problema proposto. O CPLEX usa a pesquisa *branch-and-cut* [8] para resolver os modelos de programação inteiros mistos. Entre as várias linguagens disponíveis para trabalhar neste programa, usou-se a OPL (Optimization Programming Language).

A transcrição do modelo para o programa é efetuada no ficheiro `.mod`, e é através do ficheiro `.dat` que este vai inicialmente importar os dados apresentados nas Tabelas 2.1 e 2.2. No final da execução do programa é necessário analisar os resultados obtidos, tendo sido elaborado um ficheiro *Excel* que permite a visualização da solução encontrada de forma automática.

Ao correr o programa constata-se que não é possível obter uma solução com o modelo inicialmente proposto em tempo útil. A principal dificuldade do programa é encontrar uma solução inteira que satisfaça as restrições no fim do período em estudo. Através da Tabela 4.1, pode-se observar que o número de variáveis em estudo é elevado, sendo a maioria inteiras positivas. Assim, a parte combinatória do problema torna-o de difícil resolução, uma vez que o número de soluções pode crescer exponencialmente com a dimensão do problema.

		p	t	n	Total
Variáveis de decisão do problema	$f_{t,p}^n$	12	5	52	3120
	c_p^n	12		27	324
Variáveis auxiliares do problema	$x_{t,p}^n$	12	3	52	1872
	$a_{t,p}^n$	12	3	52	1872
	$r_{t,p}^n$	12	5	52	3120
	$total_{mC,p}^n$	12		52	624
	e_p^n	12		52	624
Total de variáveis					11556

Tabela 4.1 Número de variáveis do problema.

Analisando detalhadamente o modelo, observa-se que e_p^n é obtido por uma soma de inteiros, restrições (2) e (3). Deste modo, se se considerar essa variável como sendo de natureza real, os valores que esta pode assumir não serão alterados. O mesmo ocorre com a variável $a_{t,p}^n$, uma vez que surge da restrição (7) onde as restantes parcelas são valores inteiros.

Fez-se também um estudo pormenorizado do modelo, concluindo-se que a restrição (14) é a que causa maior constrangimento para obter a solução, uma vez que ao removê-la o modelo é resolvido rapidamente. A solução encontrada nesta relaxação não é admissível para o problema inicial, uma vez que retirando-a permite que sejam resolvidas menos ordens do que as que seria possível considerar para o valor de $f_{t,p}^n$. Na prática, isto traduz que uma parte da fração da equipa não está realmente a trabalhar. Posto isto, a alternativa foi colocar a restrição com um fator de penalização na função objetivo de forma a que a diferença entre o tempo disponível a trabalhar pela fração de equipas alocada para cada tarefa e o número de ordens resolvidas seja mínimo, isto é, minimizando a diferença entre

as equipas que estão a trabalhar e as equipas disponíveis. Assim, na nova formulação, pretende-se:

$$\min \sum_{p=1}^{12} \sum_{t=1}^3 x_{t,p}^D - 0.0001 \times \sum_{p=1}^{12} \sum_{t=1}^5 \sum_{n=1}^D (r_{t,p}^n - \frac{T^n}{tempo_{t,p}} \times f_{t,p}^n).$$

O fator de ponderação no segundo termo da função objetivo foi ajustado de forma a continuar a dar mais peso ao primeiro termo.

Com a nova formulação, modelo M1.1, o programa já consegue de encontrar soluções admissíveis para o problema. No entanto, o programa não finaliza a pesquisa no limite do tempo fornecido, pelo que não se tem a garantia que a solução encontrada seja ótima.

Alternativamente, optou-se por considerar a melhor solução encontrada ao fim de uma hora de execução. Esta solução está apresentada de forma resumida na Figura 4.1, através de um gráfico global, no qual se apresentam conjuntamente os valores de todas as tarefas e de todas as empresas.

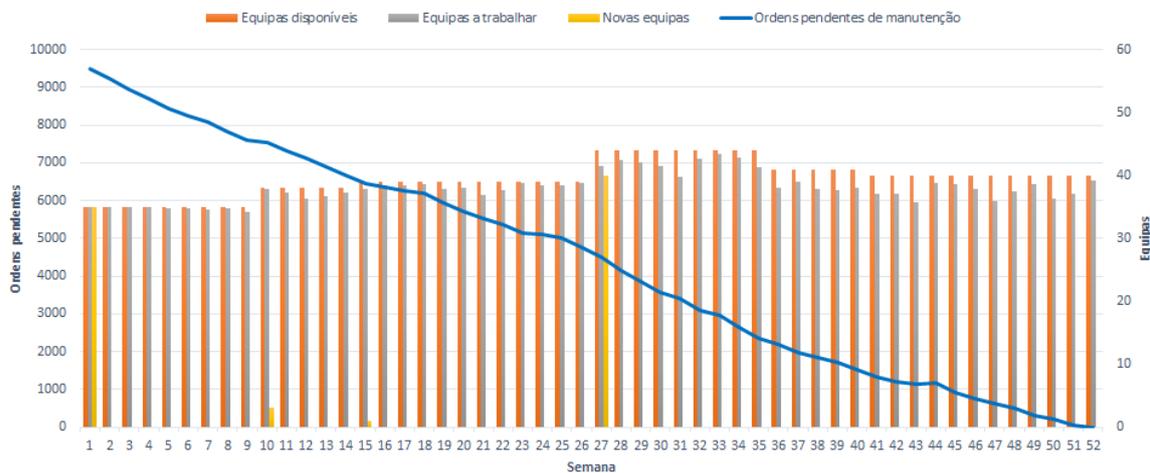


Fig. 4.1 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período em estudo na solução do modelo M1.1.

A solução mostra que é necessário disponibilizar 79 equipas para resolver as ordens pendentes totais. Uma vez que não é possível garantir que a solução seja ótima, pelas razões enunciadas anteriormente, definiu-se uma outra métrica para avaliar a qualidade da solução. A métrica utilizada consiste em calcular a percentagem de equipas disponíveis que não estão a trabalhar ao longo do período de estudo. A EDP Distribuição indicou o valor 5% como máximo aceitável neste critério, tendo em conta que existem alguns fatores que o modelo não engloba. A título de exemplo, os feriados municipais, dependentes da zona geográfica e portanto das empresas, não estão contemplados, assim como fatores externos (condições climatéricas,...) que poderão ocorrer e que levarão a que existam mais avarias do que as previstas ou prolonguem o tempo estimado para a realização das tarefas. Deste modo, é uma boa estratégia haver uma percentagem de equipas disponíveis para atenuar estes acontecimentos não contemplados no modelo. O valor encontrado de equipas sem trabalhar na solução apresentada é de 3,88%, encontrando-se dentro da margem indicada.

Posteriormente, a solução foi melhorada utilizando um estratégia de pesquisa local, para cada empresa, no sentido de averiguar se é possível resolver todas as ordens pendentes com recurso a menos equipas.

Neste contexto, resolveu-se o problema de cada empresa separadamente limitando o número de equipas disponíveis ao valor obtido na solução do modelo M1.1. Sempre que seja possível resolver este problema (isto é, encontrar uma solução com número de ordens pendentes nula no fim de estudo e uma percentagem de equipas sem trabalhar inferior a 5%), diminui-se uma unidade no número de equipas disponíveis e repete-se o procedimento. Deste modo, acrescenta-se a seguinte restrição, envolvendo o número de equipas disponíveis da solução do modelo M1.1 (ℓ_p) cujos valores são os apresentados na Tabela 4.2:

$$\sum_{n=1}^{D-d+1} c_p^n \leq \ell_p - 1, \quad p \in P.$$

p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ℓ_p	7	3	5	10	10	5	10	3	5	9	6	6

Tabela 4.2 Valores do parâmetro ℓ_p para cada empresa p obtidos com a solução encontrada com o modelo M1.1.

Para o exemplo apresentado considera-se $D = 52$ e $d = 26$. Executando o novo modelo (M1.2) para cada empresa, constatou-se que as empresas 7 e 12 conseguem ainda resolver todas as ordens pendentes com menos uma equipa. Consequentemente, a solução encontrada anteriormente não é a ótima. O procedimento anterior foi repetido e não se obteve melhor solução, concluindo-se assim que a melhor solução global encontrada pelo modelo M1.2 para cada empresa é a apresentada seguidamente na Figura 4.2.

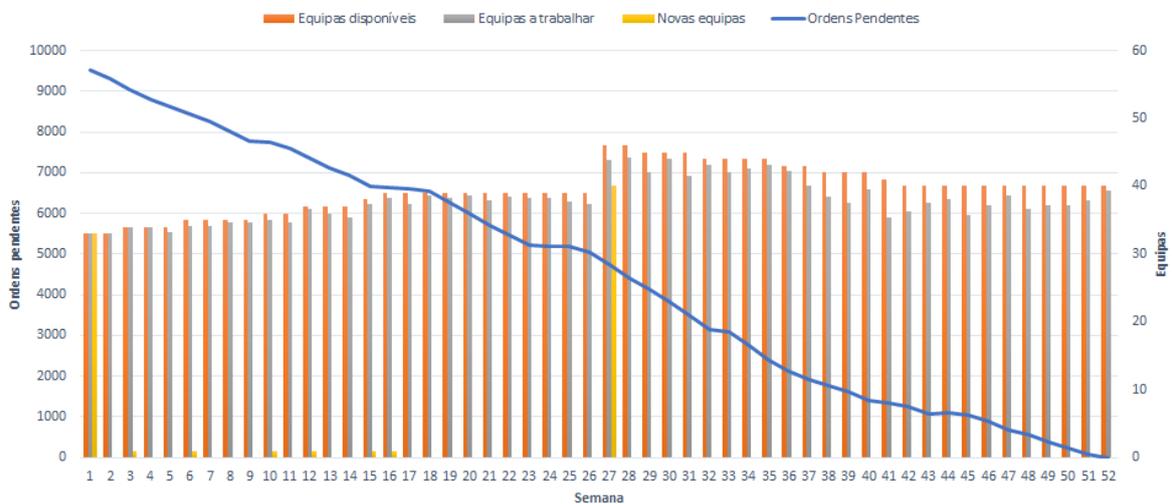


Fig. 4.2 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo da solução após melhoramento com pesquisa local (modelo M1.2).

A percentagem de equipas sem trabalhar diminuiu para 2,84%, com 77 equipas disponibilizadas. Para além do gráfico geral apresentado, também foram construídos gráficos individuais de cada empresa de forma a possibilitar um estudo detalhado da solução, os quais se encontram no Anexo B. Os gráficos possíveis de observar são relativos ao comportamento do número de ordens pendentes das tarefas de manutenção com o número de equipas total no período em estudo. Note-se que apenas se

considera o número de ordens pendentes das tarefas de manutenção uma vez que as ordens pendentes de instalação têm de estar completamente concluídas no final do estudo (pelo que o seu valor terá de ser nulo na última semana).

De forma a conseguir comparar a eficiência da solução obtida pelo modelo proposto com a situação atualmente implementada pela empresa, surge a seguinte tabela, criada com os valores de cada gráfico indicado no Anexo B.

Semana	Empresa												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Solução proposta pelo CPLEX para o modelo M1.2													
Equipas disponíveis para 2019	7	3	5	10	10	5	9	3	5	9	6	5	
Equipas disponíveis	1-8	3	1	3	4	6	1	3	1	2	5	3	2
	9-17				6		2						
	18-19				6		4						
	20-26												
	27-34	4	2	2	4	4	6	2	3	4	3	3	
	35-43												
	44-45												
46-52	4	2	2	4	4	3	5						
Equipas sem trabalhar (%)	0.56	5.21	3.36	1.81	2.56	0.07	0.02	25.32	5.44	2.84	4.16	0.00	
Situação Atual													
Equipas disponíveis para 2019	*	*	12	38	4	4	14	4	8	16	34	18	
Equipas disponíveis por semana	*	*	6	19	2	2	7	2	4	8	17	9	

*A aguardar informação da respetiva empresa.

Tabela 4.3 Comparação entre a solução encontrada com o modelo M1.2 e a situação atual praticada pela empresa.

Analisando a tabela da solução obtida com o modelo proposto, na maioria das empresas ocorre uma diminuição do número de equipas. Nas empresas 5 e 6, o número de equipas disponíveis necessário para que no final do período de estudo não existam ordens pendentes é superior ao apresentado pela situação atual da empresa, o que indica que o número de equipas atual não deverá ser suficiente para resolver todas as ordens pendentes até ao fim de 2019.

Relativamente à percentagem de equipas sem trabalhar no modelo proposto M1.2, a empresa 8 apresenta um valor elevado comparativamente aos outros valores. No entanto, tentando diminuir uma unidade ao número de equipas disponíveis não foi possível encontrar uma solução que permita resolver todas as ordens pendentes, ficando uma ordem pendente por resolver.

Assim, apesar de ainda não se ter obtido os valores da situação atual relativamente às duas primeiras empresas, globalmente, ela necessita de, pelo menos, 150 equipas para tratar as ordens pendentes. Contudo, a solução proposta pelo modelo M1.2, considerando todas as empresas, apenas necessita de 77 equipas, quase metade das existentes atualmente.

A principal vantagem dos modelos desenvolvidos é a possibilidade de alteração do número de equipas ao longo do período de estudo e a respetiva fração de equipas a trabalhar em cada tarefa, contrariamente ao que existe atualmente. Nos modelos propostos, a fração de equipas a trabalhar em cada tarefa altera-se semanalmente de forma a encontrar a melhor solução. Claramente esta situação é a mais aproximada ao pretendido pela EDP Distribuição, uma vez que cada equipa está apta a conseguir resolver todas as tarefas.

O modelo para além do objetivo final, ainda apresenta detalhadamente o comportamento das variáveis em estudo semanalmente, possibilitando com que esta possa ser monitorizada a médio prazo.

4.1.2 Alteração das restrições das ordens pendentes de instalação

Analisando com maior detalhe as restrições (15) e (16) do problema linear inteiro misto apresentado anteriormente, estas podem causar alguns conflitos quando os dados sofrerem alterações. As discrepâncias relativas ao valor médio são tanto maiores quanto maior for o valor inicial que se pretende instalar ao longo do período de estudo, ou seja, x_t^0 com $t \in T_{ins}$.

Na Figura 4.3 apresenta-se o número total de instalações semanais obtidas na solução do modelo M1.1, sendo possível observar a discrepância existente em semanas distintas. Estas discrepâncias surgem porque se admite uma variação de 20% e 40% relativamente ao valor médio (que por vezes é um valor relativamente considerável) dos equipamentos insD e insC, respetivamente.

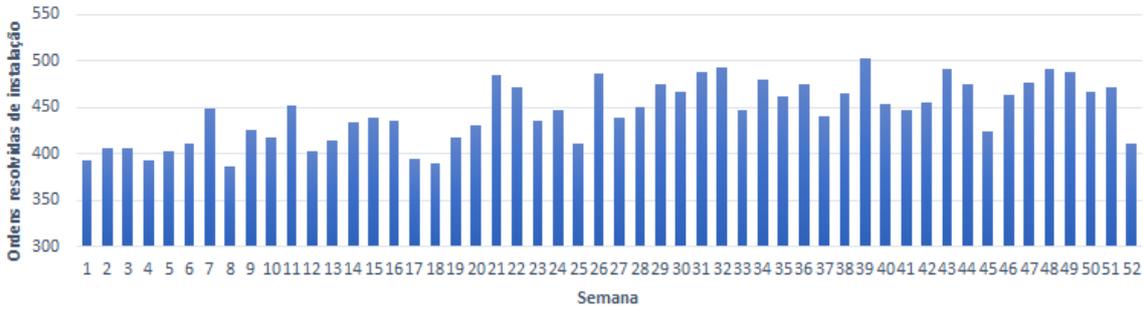


Fig. 4.3 Análise do comportamento das ordens resolvidas de instalação ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.1.

Analisando a Figura 4.3, existem variações de 117 ordens resolvidas de instalação entre semanas, sendo uma situação não desejável para a EDP Distribuição. Outra situação indesejável, surge quando se consideram valores x_t^0 com $t \in T_{ins}$ muito pequenos. Nessa situação, o intervalo de possíveis valores para $r_{t,p}^n$ pode ser muito pequeno, podendo inclusive, não conter nenhum valor inteiro, impossibilitando a resolução do problema.

Exemplificando, quando se pretende instalar $x_t^0 = 20$ equipamentos da tarefa t , com $t \in T_{ins}$ ao longo de um período de estudo igual a um ano (ou seja, $D = 52$ semanas) e considerando $erro_t = 0.4$, verificam-se as seguintes duas restrições:

$$(1 - 0.4) \times \frac{20}{52} \leq r_{t,p}^n \Leftrightarrow 0.6 \times 0.3846 \leq r_{t,p}^n \Leftrightarrow 0.2308 \leq r_{t,p}^n$$

$$(1 + 0.4) \times \frac{20}{52} \geq r_{t,p}^n \Leftrightarrow 1.4 \times 0.3846 \geq r_{t,p}^n \Leftrightarrow 0.5385 \geq r_{t,p}^n.$$

Como $r_{t,p}^n$ é uma variável inteira, não existe solução do problema. Desse modo, para evitar o conflito nesta restrição, o programa irá relaxar esta restrição de forma a pesquisar uma solução.

Como alternativa destas restrições, e uma vez que o objetivo é desenvolver um modelo que se adapte a quaisquer dados, consideram-se as restrições seguintes:

$$\frac{x_t^0}{D} - 1 \leq r_{t,p}^n, \quad t = 4, 5, \quad n = 1, \dots, D, \quad p = 1, \dots, 12$$

$$\frac{x_t^0}{D} + 1 \geq r_{t,p}^n, \quad t = 4, 5, \quad n = 1, \dots, D, \quad p = 1, \dots, 12.$$

Estas novas restrições adaptam-se a quaisquer dados de $x_{t,p}^0$ com $t \in T_{ins}$ e não necessitam do parâmetro $erro_t$ para $t \in T_{ins}$. Deste modo, as oscilações de $r_{t,p}^n$ vão estar compreendidas entre os inteiros imediatamente antes e depois do valor médio das reparações a efetuar por semana.

Executando o programa com as alterações anteriores, o esperado é obter uma solução mais uniforme no que respeita ao número de instalações, podendo originar uma percentagem mais elevada de equipas sem trabalhar. De facto, para os dados de EDP Distribuição relativos ao final de 2018, as restrições do modelo M1.1 são mais abrangentes, estando a região admissível do novo modelo (M1.3) contida na do modelo anterior. A Figura 4.4 ilustra o número de instalações efetuadas ao longo das semanas com a nova formulação.

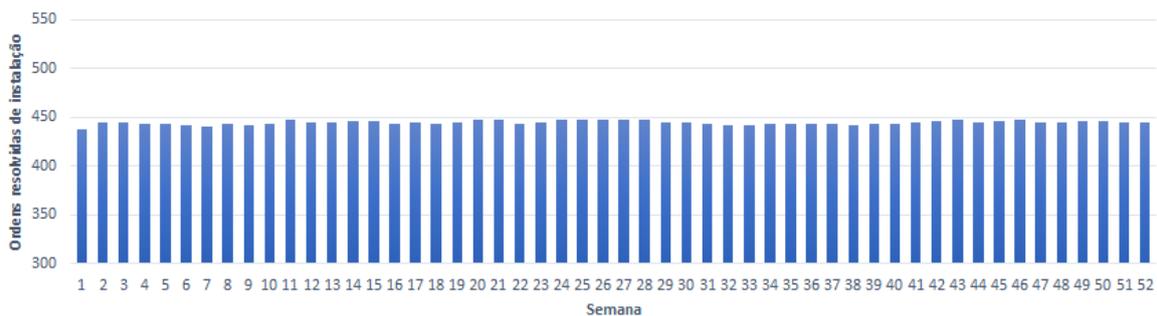


Fig. 4.4 Análise do comportamento das ordens resolvidas de instalação ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3.

A discrepância de ordens resolvidas de instalação é mínima, uma vez que se está a considerar os dois equipamentos que têm ordens pendentes de instalação das 12 empresas.

A Figura 4.5 ilustra a melhor solução global encontrada através do software CPLEX com as novas restrições, quando executando o programa em 10 minutos. Outros tempos superiores foram testados, tendo obtido os mesmos resultados.

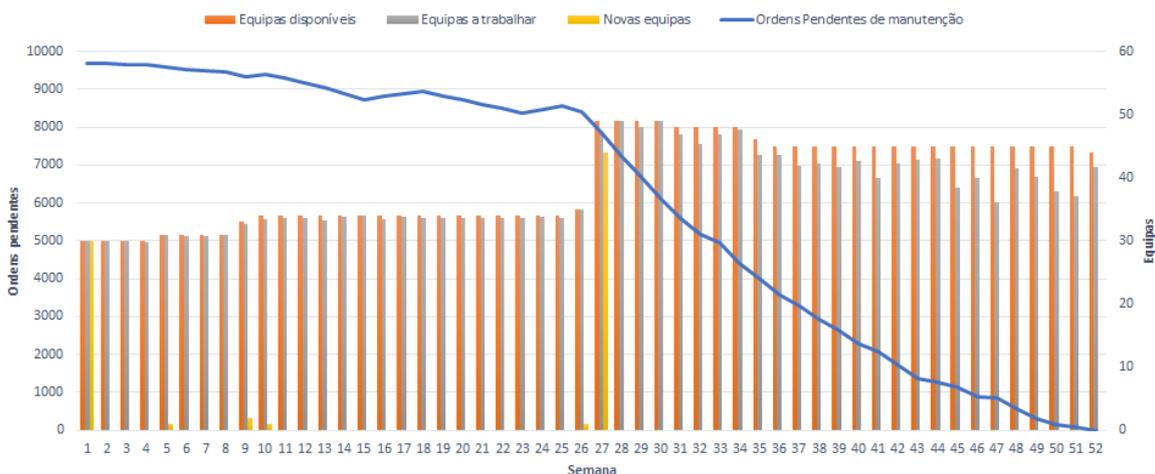


Fig. 4.5 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3.

Observando a Figura 4.5 é possível concluir que a percentagem de equipas sem trabalhar no primeiro semestre (nas primeiras 26 semanas) é muito reduzida e que foram resolvidas poucas ordens pendentes

de manutenção. Por outro lado, no segundo semestre, observa-se uma diminuição acentuada do número de ordens pendentes de manutenção como consequência de um aumento do número de equipas disponíveis, acarretando também um aumento da percentagem de equipas sem trabalhar. O comportamento da solução tem como objetivo resolver parte das ordens pendentes de instalação (obrigatórias) no primeiro semestre e utilizar as sobras das equipas para resolver ordens pendentes de manutenção, deixando o restante trabalho para o segundo semestre. Uma possível explicação para este facto é que, existindo mais ordens pendentes de manutenção no segundo semestre, verificam-se mais oportunidades de as combinar por forma a diminuir a percentagem de equipas sem trabalhar. Como anteriormente, não tendo a garantia da solução ótima, a métrica utilizada para estudar a fiabilidade da solução para a empresa é a percentagem de equipas sem trabalhar. Na solução geral apresentada na Figura 4.5, a percentagem global de equipas sem trabalhar é de 4,32%, sendo uma "boa" solução para a EDP Distribuição. Como esperado, este valor aumentou quando comparado com a solução pelo modelo M1.1. No entanto, mantém-se o mesmo número total de equipas necessárias para a resolução do número de ordens pendentes ao longo do período de tempo em estudo - ver Tabela 4.4.

Empresa	Restrições das ordens pendentes de instalação			
	Modelo M1.1		Modelo M1.3	
	Equipas	Equipas sem trabalhar	Equipas	Equipas sem trabalhar
1	7	0.1160%	7	0.4470%
2	3	5.7732%	3	6.2078%
3	5	3.5541%	5	4.7186%
4	10	1.9983%	10	2.3173%
5	10	3.0028%	10	3.8145%
6	5	0.1439%	5	0.0713%
7	10	4.6371%	10	5.4506%
8	3	24.6768%	3	24.1669%
9	5	4.1351%	5	4.5588%
10	9	2.0409%	9	1.7472%
11	6	4.3745%	6	5.2649%
12	6	5.7230%	6	6.1948%
Total	79	3.8818%	79	4.3201%

Tabela 4.4 Análise das diferenças entre as melhores soluções encontradas pelos modelos M1.1 e M1.3 para cada empresa.

Na Tabela 4.4 observa-se que, em geral, a percentagem de equipas sem trabalhar em cada empresa aumenta na solução do modelo M1.1 para o modelo M1.3. Apenas as empresas 6, 8 e 10 não seguem esse padrão, o que pode ser justificado pelas soluções encontradas ainda não serem ótimas.

Na Tabela 4.5 reportam-se os tempos de execução, o número de soluções admissíveis armazenadas e o gap de otimalidade¹ para cada uma das soluções.

¹Gap de otimalidade (ou gap) é a diferença relativa entre a melhor solução inteira encontrada e o valor obtido pela relaxação (das restrições de integralidade) do problema.

	Ordens pendentes de instalação	
	Modelo M1.1	Modelo M1.3
Gap	69.37%	27.59%
Soluções	422	82
Tempo de execução	1h	10min

Tabela 4.5 Valores obtidos no CPLEX para as melhores soluções encontradas pelos modelos M1.1 e M1.3.

No modelo M1.1, a região admissível é maior e, portanto, o software pode ter encontrado soluções iniciais admissíveis muito afastadas da solução ótima. Consequentemente, precisa de atualizar mais vezes a melhor solução encontrada, podendo esta ainda estar afastada da solução ótima após uma hora de execução.

No modelo M1.3 ocorre a situação contrária. A região admissível é menor e o software não tem tantas soluções alternativas para testar na vizinhança de uma "má" solução e rapidamente é encaminhado na direção da solução ótima.

Uma vez que não existe a garantia de que a solução encontrada seja ótima, recorreu-se ao método de pesquisa local para tentar melhorar a solução de cada empresa separadamente seguindo um processo análogo ao realizado no modelo M1.2. Após a análise desta pesquisa, constatou-se que a solução obtida não acrescentava melhorias para a solução encontrada, considerando a solução já exposta na Figura 4.5.

Semana	Empresa														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
Solução proposta pelo CPLEX para o modelo M1.2															
Equipas disponíveis para 2019	7	3	5	10	10	5	9	3	5	9	6	5			
Equipas sem trabalhar (%)	0.56	5.21	3.36	1.81	2.56	0.07	0.02	25.32	5.44	2.84	4.16	0.00			
Solução proposta pelo CPLEX com o modelo M1.3															
Equipas disponíveis para 2019	7	3	5	10	10	5	10	3	5	9	6	6			
Equipas disponíveis	1-4	2	1	2	5	3	1	4	1	2	5	2	2		
	5-8	3				5								1	4
	9		2	3	5		6	2	3	4					
	10-25										4	2	3	5	
	26	4	3	5	6	2	3	4							
	27-30								4	3	5	6	2	3	4
	31-34	4	3	5	6	2	3	4							
	35								4	3	5	6	2	3	4
36-51	4	3	5	6	2	3	4								
52								4	3	5	6	2	3	4	
Equipas sem trabalhar (%)	0.44	6.21	4.72	2.32	3.81	0.07	5.45								24.17
Situação Atual															
Equipas disponíveis para 2019	*	*	12	38	4	4	14	4	8	16	24	18			
Equipas disponíveis por semana	*	*	6	19	2	2	7	2	4	8	17	9			

*A aguardar informação da respetiva empresa.

Tabela 4.6 Comparação entre as soluções encontradas pelos modelo M1.2 e M1.3 com a situação atual praticada pela empresa.

A partir da Tabela 4.6 é possível constatar que existe uma diferença de duas equipas entre as soluções do modelo M1.2 e M1.3 estando associadas às empresas 7 e 12. Apesar de nas restantes empresas o número total de equipas disponíveis para 2019 ser iguais em ambas as soluções, a forma como estas

são alocadas em cada semana é feita de forma diferente. As duas novas equipas disponíveis provocam um aumento significativo na percentagem de equipas sem trabalhar nas empresas correspondentes. As restantes empresas apresentam valores semelhantes na percentagem de equipas sem trabalhar.

Salienta-se ainda que, nas soluções de ambos os modelos, as empresas 5 e 6 são as que necessitam de mais equipas que as disponíveis atualmente no terreno.

A solução implementada pelo modelo M1.3 é mais uniforme no que diz respeito às instalações e por isso a EDP Distribuição achou preferível manter este modelo.

4.2 Heurística H1

Ter acesso a um software que permita resolver um problema de otimização nem sempre é fácil, quer pela necessidade de recursos humanos experientes na sua utilização, quer pelo elevado custo que este pode trazer. Alternativamente, o cálculo das equipas e respetivas frações associadas semanalmente a cada tarefa em cada empresa para obter o mínimo de ordens pendentes pode ser calculado através de uma heurística.

Uma heurística permite obter uma solução rápida do problema, cujo resultado por norma não é uma solução ótima mas que se pode aproximar desta. Atendendo a que atualmente a EDP Distribuição não tem disponível qualquer software de otimização, surge assim a necessidade de criar uma heurística, para fornecer uma solução ajustada na aplicação a novas situações, enquanto não se verificar o investimento no software de otimização.

A ideia principal do funcionamento da heurística consiste na distribuição mais ou menos homogénea do número de ordens pendentes no instante inicial pelo número de semana em estudo obtendo como número de equipas o teto do total das frações alocadas a cada tarefa. No entanto, as horas laborais diferem em algumas semanas e portanto o procedimento anterior é apenas feito para as ordens pendentes de instalação, obtendo o número de equipas necessárias através do teto da soma das frações alocadas às instalações. Deste modo, pode-se aproveitar as equipas que estão sem trabalhar nas semanas com mais horas laborais para reparar as ordens pendentes de manutenção possíveis para cada equipamento, iniciando-se com tarefa com maior tempo de execução. Deste modo, distribui-se as restantes ordens pendentes de manutenção (com maior tempo de execução) uniformemente pelas 52 semanas como no passo anterior, atualizando o correspondente número de equipas disponíveis. O processo repete-se na próxima tarefa ainda não tratada com maior tempo de execução e termina quando se distribuir todas as ordens pendentes de manutenção.

Por último, é necessário considerar as avarias que vão surgindo ao longo das semanas. Deste modo, a heurística verifica se é possível resolvê-las com as frações de equipas que ainda não estão a trabalhar ou se é necessário colocar mais uma equipa disponível para completar a tarefa. O número total de equipas disponíveis é o teto do valor das equipas que estão alocadas a cada tipo de ordem.

Como o tempo disponível de cada equipa é de 26 semanas, considera-se que se dispõem do número de equipas igual ao máximo em cada semestre.

Descrição do algoritmo

1. Leitura dos dados do problema.

2. Cálculo do número de ordens pendentes de instalação semanalmente, onde

$$x_{t,p}^n = x_{t,p}^{n-1} - r_{t,p}^n, \quad t \in T_{ins}, \quad p \in P, \quad n \in N,$$

onde

$$r_{t,p}^n = \left\lceil \frac{x_{t,p}^{n-1}}{D - (n-1)} \right\rceil, \quad t \in T_{ins}, \quad p \in P, \quad n \in N.$$

3. Seguidamente obtém-se a fração de equipas necessária para resolver o número de ordens resolvidas anteriormente, ou seja,

$$f_{t,p}^n = r_{t,p}^n \times \frac{tempo_{t,p}}{T^n}, \quad t \in T_{ins}, \quad p \in P, \quad n \in N.$$

4. Uma vez que se considera a duração das equipas disponíveis de d semanas, admite-se que as equipas apenas podem ter disponíveis na semana 1 e na semana 27, para o cenário em questão. Assim, a fração de equipas disponíveis a trabalhar em cada semana semestralmente corresponde ao maior valor de $f_{t,p}^n$ nesse semestre, para cada $t \in T_{ins}$ e $p \in P$.

5. Como se considera o maior valor de $f_{t,p}^n$ em cada semestre, existem semanas em que se obtém $f_{t,p}^n$ de menor valor. Esta diferença ocorre porque existem equipas disponíveis que não estão a trabalhar na totalidade todas as semanas e portanto consideram-se estas "sobras" para posterior aproveitamento.

6. Após distribuídas as ordens pendentes de instalação a efetuar em cada semana, considera-se as ordens pendentes de manutenção. Estas são calculadas separadamente, começando por considerar a tarefa com ordens pendentes de manutenção cujo tempo de execução é maior, uma vez que são as mais difíceis de alocação na solução.

7. Considerando as equipas que estão sem trabalhar no ponto 5, começa-se por aproveitar essas para reparar semanalmente as ordens pendentes da tarefa anterior.

(a) Caso não seja possível resolver todas as ordens pendentes da tarefa em questão pelo processo anterior, divide-se o número de ordens pendentes por resolver pelas D semanas, de forma análoga ao ponto 2. De seguida, como no ponto 3, calcula-se a fração que foi necessária adicionar para resolver as restantes ordens e considera-se o valor máximo dessa fração em cada um dos dois semestres para o cálculo das equipas disponíveis.

Atualiza-se a fração de equipas que foram necessárias para reparar as ordens pendentes com maior tempo de execução, em cada semana.

(b) Caso seja possível reparar todos os equipamentos com as equipas anteriores, basta acrescentar a fração de equipas que foram necessárias semanalmente para reparar as ordens pendentes com maior tempo de execução.

8. Atualiza-se o valor de equipas sem trabalhar.

9. Considera-se agora a tarefa com ordens pendentes de manutenção com o segundo maior tempo de execução e volta-se para o ponto 6. Repete-se o processo até resolver todas as ordens pendentes de manutenção.

10. Na fase seguinte, consideram-se as avarias, sendo estas um inteiro calculado do seguinte modo:

$$a_{t,p}^n = \text{round}(\text{taxa}_t \times (\text{total}_{t,p} - x_{t,p}^{n-1})), \quad t \in T_m, \quad p \in P, \quad n \in N,$$

com a particularidade que o total relativo à tarefa mC é incrementado semanalmente.

11. Recalcula-se o valor das reparações a fazer semanalmente, considerando

$$r_{t,p}^n = r_{t,p}^{n-1} + a_{t,p}^n,$$

e como consequência atualiza-se também o valor de $f_{t,p}^n$, com $t \in T_m, p \in P, n \in N$.

12. Considera-se o valor máximo da soma das frações das ordens pendentes de manutenção dos dois semestres distintos e adiciona-se valor máximo da soma das frações das ordens pendentes de instalação também dos dois períodos distintos. Os valores obtidos para cada empresa correspondem a um limite superior de equipas necessárias disponíveis em cada período de tempo. Contudo, como o número de equipas tem de ser um valor inteiro, considera-se o menor inteiro que contenha esse limite.

13. Transcrevem-se os valores obtidos pela heurística para um ficheiro *Excel*.

A implementação deste algoritmo é feita através do software MATLAB, cujo código poderá ser consultado no Anexo A.1. Os dados para a execução da heurística são os mesmos que os usados anteriormente, para posterior análise e comparação com a solução do modelo obtido pelo CPLEX e da situação atual. Segue-se o solução global devolvida pela heurística.

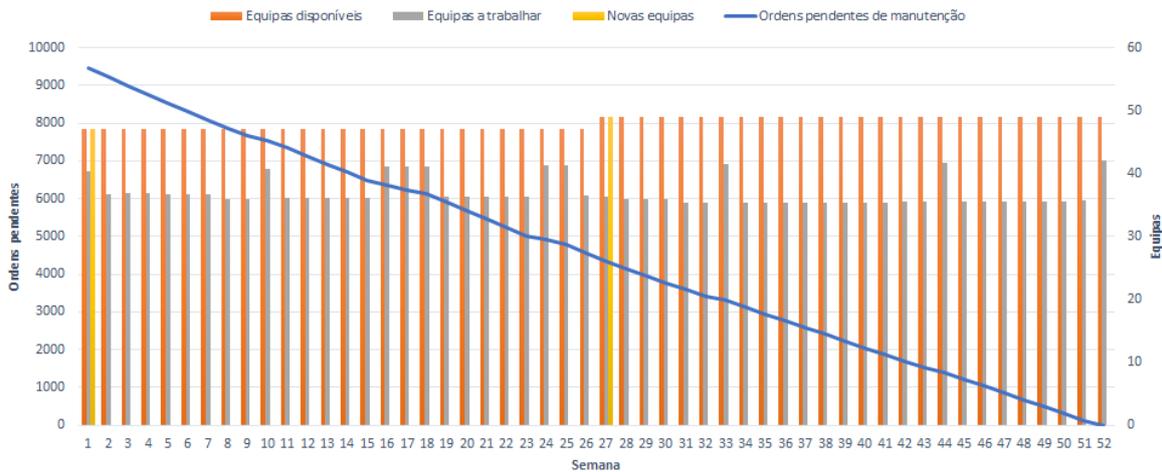


Fig. 4.6 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução heurística H1.

A percentagem de equipas sem trabalhar ilustrada na Figura 4.6 é de aproximadamente 23,06%, necessitando de um total de 96 equipas ao longo do período de estudo para resolver todas as ordens

pendentes.

O número de equipas disponíveis ao longo do período de estudo não apresenta grande discrepância entre os dois semestres, o que já seria expectável. A diferença resulta do aumento de equipamentos funcionais e consequentemente num maior número de avarias que leva a um aumento da fração de equipas alocadas para repará-las. Além disso, nas semanas que existem feriados, a diferença entre o número de equipas disponíveis e que estão a trabalhar diminui. Esta diferença justifica-se por existir um menor número de horas laborais para reparar os mesmo número de equipamentos.

Observa-se ainda que as ordens pendentes de manutenção vão sendo resolvidas uniformemente ao longo do período de estudo.

A Tabela 4.7 permite concluir que a solução obtida com a heurística é uma solução intermédia entre a solução do modelo M1.3 e a situação atual, uma vez que precisa de mais 17 equipas que a primeira e menos 46 equipas do que a segunda (faltando considerar o número de equipas das empresas 1 e 2, no caso da situação atual). Observa-se ainda que, e cada empresa, a solução heurística precisa de, no máximo, mais duas equipas que a solução do modelo M1.3. Relativamente à situação atual, a solução heurística apenas necessita de mais equipas nas empresas 5 e 6, como já tinha sido constatado com a solução do modelo M1.3.

	Semana	Empresa											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Solução proposta pelo modelo M1.3													
Equipas disponíveis para 2019		7	3	5	10	10	5	10	3	5	9	6	6
Equipas sem trabalhar (%)		0.44	6.21	4.72	2.32	3.81	0.07	5.45	24.17	4.56	1.75	5.26	6.19
Solução proposta pela heurística H1													
Equipas disponíveis para 2019		9	4	6	12	12	7	12	4	6	10	8	6
Equipas disponíveis	1-26	4	2	3	6	6	3	6	2	3	5	4	3
	27-52	5	2	3	6	6	4	6	2	3	5	4	3
Equipas sem trabalhar (%)		22.0	33.4	22.1	19.6	21.3	25.9	23.0	53.1	22.5	12.7	30.0	14.4
Situação Atual													
Equipas disponíveis para 2019		*	*	12	38	4	4	14	4	8	16	24	18
Equipas disponíveis por semana		*	*	6	19	2	2	7	2	4	8	17	9

*A aguardar informação da respetiva empresa.

Tabela 4.7 Comparação entre as soluções do modelo M1.3 e da heurística H1 e a situação atual praticada pela empresa.

Salienta-se que o objetivo da heurística é construir uma solução mais homogénea, não tendo sido feito um reajuste dinâmico das frações de equipas associadas a cada tarefa, tendo como consequência um aumento de percentagem de equipas sem trabalhar.

4.3 Simulador

Os modelos criados consideram o valor médio como estimativa do número de avarias ao longo de todas as semanas nas restrições (7)-(11). No entanto, existe um desfazamento temporal entre a obtenção da solução e a sua posterior aplicação. Desse modo, o número de avarias existente numa semana pode ser diferente no número inicialmente previsto (valor médio).

A previsão do número de avarias semanais poderia ser efetuada de uma forma mais rigorosa utilizando, por exemplo, séries temporais (ou várias, caso se averiguasse que o número de avarias é dependente

de cada empresa ou zona geográfica). Porém, devido à falta de dados históricos, não foi possível proceder deste modo.

Para simular um número de avarias diferente do inicial e testar a eficiência do modelo com as possíveis alterações das mesmas, considerou-se uma variável aleatória $aa_{t,p}^n \sim U[0; 2 \times a_{t,p}^n]$, onde $aa_{t,p}^n$ com $t \in T_m$, $p \in P$, $n \in N$ para representar o número de avarias ocorridas semanalmente nos equipamentos com ordens pendentes de manutenção em cada empresa para a simulação do modelo.

Para obtenção de uma realização do novo número de avarias e simulação destas na solução obtida pelo modelo M1.3, implementou-se um programa em MATLAB, cujo código se encontra no Anexo A.2. Com este programa, simula-se a fração $f_{t,p}^n$ e determina-se o número de ordens resolvidas $r_{t,p}^n$ para a realização do número de avarias $aa_{t,p}^n$ geradas pelo código, com $n \in N$, $t \in T_m$ e $p \in P$. Note-se que em algumas semanas poderá não ser necessário utilizar o valor total de $f_{t,p}^n$ (devido a um pequeno número de ordens pendentes) ficando com um maior número de equipas sem trabalhar destas situações.

Como o programa pretende simular uma situação de aplicação real, na fase seguinte, para cada uma das semanas, utiliza-se a fração de equipas sem trabalhar associada a uma tarefa para resolver as ordens pendentes de manutenção possíveis associadas a outras tarefas de manutenção. Deste modo, começa-se por reparar as ordens pendentes de manutenção com menor tempo de execução, de forma a conseguir resolver o maior número de ordens possíveis e assim sucessivamente. No final do período de estudo, obtêm-se as ordens pendentes de manutenção que não foi possível resolver.

De seguida, descreve-se o algoritmo utilizado para a simulação de novos dados.

Descrição do algoritmo:

1. Leitura dos dados do problema.
2. Leitura dos resultados obtidos no software CPLEX.
3. Simulação de um cenário para o número de avarias semanal utilizando uma distribuição uniforme no intervalo $[0; 2 \times a_{t,p}^n]$.
4. Atualização do número de reparações e ordens pendentes tendo em conta o cenário gerado. Note-se que o número de reparações não pode ser superior ao número de ordens por resolver.
5. Ajuste do novo número de ordens pendentes de manutenção, considerando agora em cada semana o número de ordens pendentes da semana anterior com a adição das novas avarias e subtraindo as reparações calculadas no ponto anterior.
6. Cálculo das frações de equipas sem trabalhar semanalmente em cada empresa;
7. Aproveitamento das frações anteriores² para reparar outros equipamentos com ordens pendentes, começando por reparar os equipamentos com menor tempo de reparação. Assim, recalcula-se o valor de reparações possíveis, adicionando o número de reparações feitas com as equipas que estão sem trabalhar.

²Num cenário realista, quando se tem parte das equipas sem trabalhar e existem ordens pendentes por resolver, essas são utilizadas para otimizar o trabalho.

8. Atualiza-se o valor de equipas sem trabalhar, para se possível ainda reparar outros equipamentos e repetir o ponto anterior.
9. Reajusta-se o valor de ordens pendentes semanais, como no ponto 5 com a diferença que as reparações agora a considerar são as do ponto 7.
10. Por fim, enviam-se os resultados obtidos para um ficheiro excel para posterior análise.

Os dados utilizados para as simulações foram os mesmos que os usados na Figura 4.5.

4.3.1 Simulação da solução do modelo M1.3

Nesta secção reportam-se os resultados da simulação da solução obtida com o modelo M1.3 em três cenários gerados aleatoriamente.

Através da Figura 4.7 é possível observar que existe uma linha correspondente ao número de avarias resultante da solução do CPLEX (linha azul). Observa-se que este número de avarias vai aumentando ligeiramente ao longo do período de estudo, o que se justifica com o aumento de equipamentos funcionais resultantes das reparações efetuadas. As restantes linhas ilustram a variação do número da avarias em três simulações com o número de avarias médio associado à solução encontrada pelo CPLEX para o modelo M1.3.

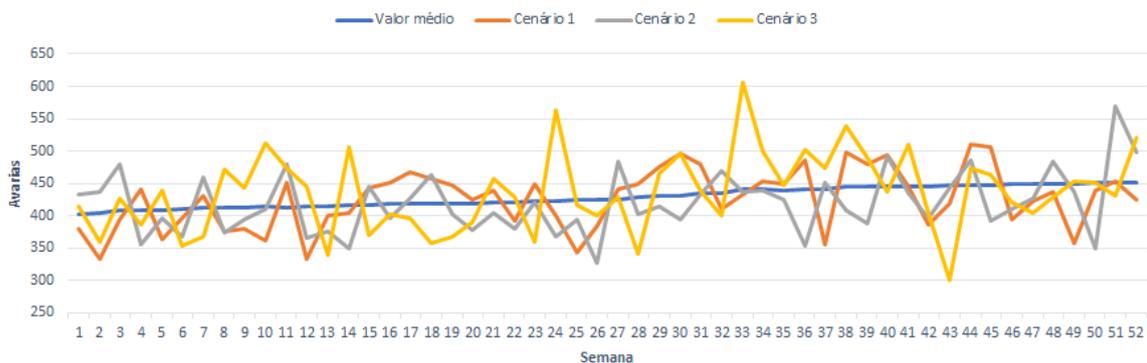


Fig. 4.7 Comparação entre o valor médio do número total de avarias semanais e o número de avarias simuladas em três cenários distintos com o modelo M1.3.

Observa-se de seguida o comportamento das ordens pendentes de manutenção da solução nos três cenários distintos.

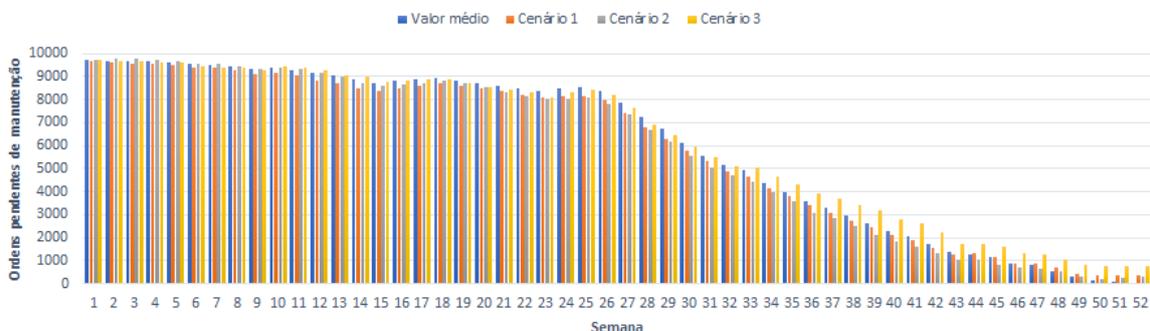


Fig. 4.8 Análise das ordens pendentes de manutenção de todas as empresas no caso de se considerar o valor médio de avarias e nos três cenários simulados na solução do modelo M1.3.

Através da Figura 4.8 observa-se que comportamento da solução nos três cenários é muito semelhante ao comportamento da solução obtida com o modelo M1.3 usando o número médio das avarias. Apesar disto, a simulação da solução nos três cenários não permitiu resolver todas as ordens pendentes. Este facto ocorre devido a existirem semanas onde o número de avarias gerado é maior do que o inicialmente estimado e a solução não consegue dar resposta a esse aumento utilizando as percentagens de equipas disponíveis sem trabalhar. Esta situação tende a piorar quando existe um período alargado em que o número de avarias nesse cenário é maior do que o valor médio estimado, como acontece no cenário 3.

	Média de avarias ao longo do período de estudo	Ordens pendentes de manutenção no final do período de estudo	Percentagem de equipas sem trabalhar
Valor médio	428,98	0	4,32%
Cenário 1	425,94	372	3,21%
Cenário 2	419,56	305	3,53%
Cenário 3	436,10	779	2,40%

Tabela 4.8 Comparação entre a média de avarias, o número de ordens pendentes de manutenção e a percentagem de equipas sem trabalhar ao longo do período de estudo quando utilizada a solução do modelo M1.3 no caso do valor médio e nos três cenários gerados aleatoriamente.

Na Tabela 4.8 consideram-se alguns aspetos a ter em conta na solução devolvida pelo modelo M1.3 e pelos três cenários anteriores. Analisando-a, constata-se que um aumento no valor médio do número total de avarias origina um aumento no número total de ordens pendentes de manutenção no final do período de estudo. Esta situação é mais acentuada no cenário 3 como foi referido anteriormente. Contudo, relativamente à percentagem de equipas sem trabalhar, verifica-se situação oposta. Uma explicação para este facto será existirem empresas onde o número de avarias da tarefa com maior tempo de execução é gerado em maior número que o valor médio. Assim, para resolver estas tarefas é necessário uma maior percentagem de equipas a trabalhar.

Para além do que já foi constatado relativamente ao cenário 3, é ainda possível perceber que o maior número de ordens pendentes de manutenção no final do período de estudo se deve também a um maior número médio do total das avarias comparativamente à solução proposta pelo modelo M1.3.

Pela Tabela 4.8 constata-se que apesar de existir um aumento do número final de ordens pendentes em todos os cenários estudados comparativamente à solução obtida com o CPLEX, a percentagem de equipas sem trabalhar diminui, isto porque se reutilizar as frações de as equipas disponíveis para trabalhar o máximo possível.

Nos três cenários anteriores, dificilmente se conseguem resolver todas as ordens pendentes existentes inicialmente quando há oscilações no valor das avarias. No entanto, quando comparando com o valor de ordens pendentes que se tinha inicialmente, 9562, este valor foi reduzido de forma muito considerável. Ainda, de notar que se está a considerar as ordens pendentes de todas as tarefas de manutenção em todas as empresas, e quando analisado estes valores separadamente, o número de ordens pendentes é muito reduzido.

O intervalo considerado para gerar o número de avarias apenas se trata de um exemplo, podendo obter resultados diferentes quando se consideram outros intervalos, ou até mesmo outras leis.

4.3.2 Simulação da solução heurística H1

Efetua-se o procedimento anterior agora para testar o comportamento da solução heurística descrita na Secção 4.2.

O número de avarias em cada cenário oscila à volta do valor registado na solução heurística, como se pode observar na figura seguinte.

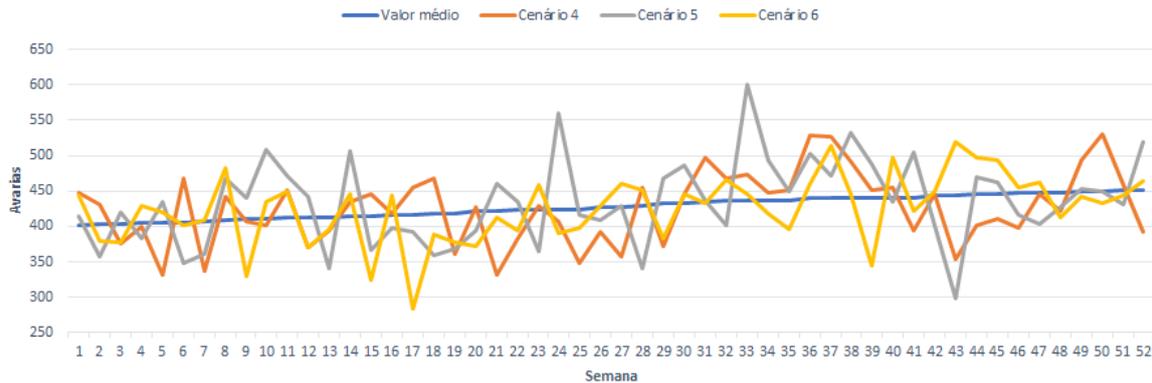


Fig. 4.9 Comparação entre valor médio do número total de avarias semanais e o número de avarias simuladas em três cenários distintos com a heurística H1.

O número de ordens pendentes de manutenção também é influenciado pelas alterações no número de avarias. No entanto, a solução heurística consegue lidar com esse aumento no número de ordens pendentes, resolvendo-as quase na totalidade no fim do tempo de estudo - ver Figura 4.10 e Figura 4.11. De facto, nesta solução existe uma percentagem significativa de equipas sem trabalhar a qual é aproveitada para tratar o excedente do número de ordens pendentes que vão surgindo. Esta situação não ocorre como a solução do modelo M1.3 uma vez que a percentagem de equipas sem trabalhar é muito reduzida.

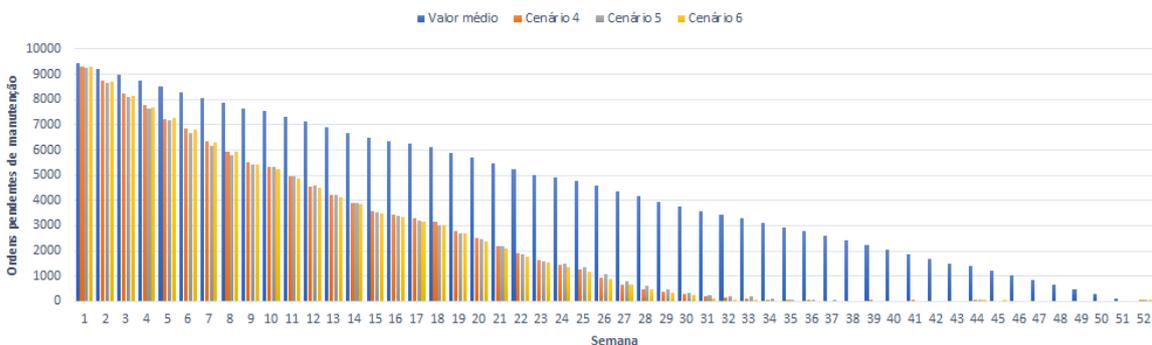


Fig. 4.10 Análise das ordens pendentes de manutenção de todas as empresas no caso de se considerar o valor médio de avarias e nos três cenários simulados na solução da heurística H1.

Analisando a figura anterior, percebe-se que existe um decréscimo mais acentuado de ordens pendentes de manutenção nas primeiras semanas. Lembra-se que a heurística H1 pretende fornecer uma solução "estática" (no sentido que as frações de equipas a trabalhar em cada tarefa variem muito pouco ao

longo do período de estudo) para estar de acordo com a situação atual praticada pela empresa. Deste modo, a solução devolvida pela heurística H1 apresenta uma maior percentagem de equipas sem trabalhar que é aproveitada durante as simulações para efetuar tarefas.

Na tabela seguinte compara-se o número de ordens pendentes de manutenção no final do período de estudo e a percentagem de equipas sem trabalhar entre a heurística e as três simulações efetuadas.

	Média de avarias ao longo do período de estudo	Ordens pendentes de manutenção no final do período de estudo	Percentagem de equipas sem trabalhar
Valor médio	427,58	0	23,06%
Cenário 4	425,44	8	22,85%
Cenário 5	434,44	31	22,23%
Cenário 6	424,92	7	23,47%

Tabela 4.9 Comparação entre a média de avarias, o número de ordens pendentes de manutenção e a percentagem de equipas sem trabalhar ao longo do período de estudo quando utilizada a solução heurística H1 no caso do valor médio e nos três cenários gerados aleatoriamente.

Repare-se que na Figura 4.10 e da Tabela 4.9 o número ordens pendentes de manutenção está muito próximo de zero nas últimas semanas, significando que os equipamentos são reparados praticamente na mesma semana que avariam. Isto acontece, dado existir uma grande percentagem de equipas sem trabalhar que consegue atenuar o aumento de ordens pendentes quando estas são maiores que o valor médio. No entanto, se ocorrerem muitas avarias seguidas, as equipas sem trabalhar podem não ser suficientes para as resolver, acumulando algumas ordens pendentes, como demonstrado nos cenários acima na última semana. Para um maior detalhe do que acontece nas últimas semanas, é exposto de seguida uma ampliação do gráfico a partir da semana 35 para os três cenários.

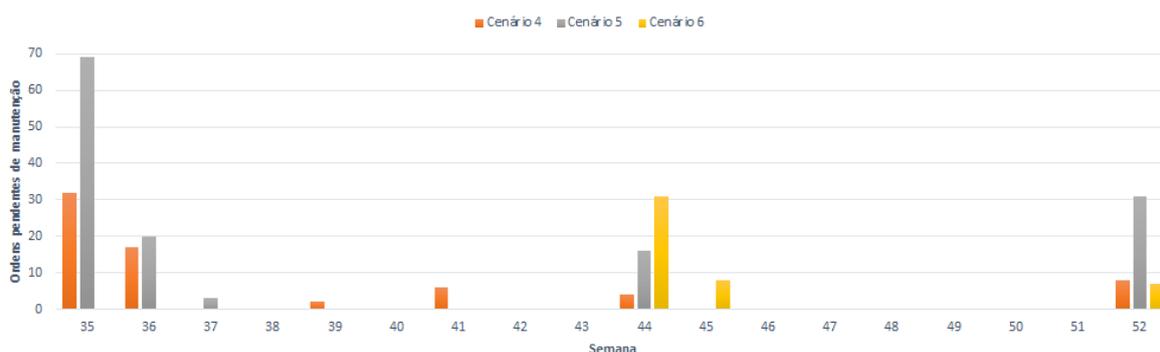


Fig. 4.11 Análise das ordens pendentes de manutenção de todas as empresas nas últimas semanas do período de estudo nos três cenários simulados da heurística H1.

Com este maior detalhe verificam-se as afirmações anteriores, constatando que o número de ordens pendentes no final do período de estudo resultam apenas do aumento do número de avarias que surgiram na última semana.

Por fim, observe-se que no cenário 4, as avarias correspondentes na última semana são menores que o valor médio contudo, existem ordens que ficam por resolver nessa mesma semana. Isto acontece porque se está a considerar a situação global das doze empresas. No entanto, apesar de em média

o número de avarias de todas as empresas ter sido inferior ao esperado pela solução heurística, não significa que o mesmo resultado se trespasse para cada empresa. Em particular, nesta situação existe uma empresa onde o valor médio de avarias é superior ao considerado pela heurística (e como não faz sentido aproveitar equipas de outras empresas para reparar o excedente de avarias), ficando por resolver as avarias no fim na semana 52.

Capítulo 5

Modelo 2: minimização do número de novas de equipas disponíveis

Observando os gráficos do capítulo anterior, o objetivo principal é facilmente atingido, ou seja, minimizar o número de ordens pendentes de manutenção na última semana do período de estudo e efetuar todas as ordens pendentes de instalação. Analisando essa solução com maior detalhe, observa-se que a maior parte das ordens de manutenção são resolvidas nas últimas d semanas, sendo que nas primeiras semanas em algumas empresas ainda ocorre um aumento destas. Este facto, ocorre por se pretender minimizar a percentagem de equipas sem trabalhar todas as semanas, enquanto que a minimização das ordens pendentes de manutenção apenas envolve a última semana.

O modelo desenvolvido permite após D semanas dar resposta à EDP Distribuição relativamente ao objetivo principal da empresa, minimizar as ordens pendentes de manutenção. No entanto, será que é possível obter um modelo que consiga resolver as ordens pendentes de manutenção num menor número de semanas? A resposta é afirmativa para os dados que se está a analisar, uma vez que o número de equipas disponíveis é sempre inferior ao limite estabelecido m_p , com $p \in P$.

Ainda, será que se pretende obter o número de ordens pendentes de manutenção igual a zero? Pela simulação apresentada no capítulo anterior, constata-se que, numa situação real, as avarias das últimas semanas podem não ser completamente resolvidas. Desse modo, considera-se um modelo alternativo para o problema onde se estabelece um limiar para o número de ordens pendentes de manutenção e se pretende minimizar o número de equipas necessárias para atingir esse limiar.

5.1 Modelo M2

A formulação consiste agora em resolver a maioria das ordens pendentes de manutenção num menor período de tempo que as D semanas, sendo quanto menor o período de tempo, mais eficiente se torna o trabalho para a EDP Distribuição. Quantos mais equipamentos funcionais existirem melhor, uma vez que lhes permite fazer as leituras dos dados fornecidos pelos mesmos.

Foram estudados vários períodos em que se pretendia resolver as ordens pendentes de manutenção, tendo-se chegado à conclusão que o melhor período para as resolver seria as d primeiras semanas, o qual corresponde ao período de semanas em que as primeiras equipas trabalham. Esta abordagem permite que não haja uma grande discrepância entre o número de equipas disponíveis e as que estão

a trabalhar. Surge assim uma questão: Após as d primeiras semanas, quando se resolvem as ordens pendentes de manutenção que vão surgindo, associadas às avarias dos equipamentos?

Idealmente, a resposta será na medida em que as novas ordens pendentes de manutenção surjam exista possibilidade de as resolver, no entanto, como a unidade de estudo é a semana, não é possível ter a garantia que na mesma semana que ocorrem avarias estas sejam possíveis de ser reparadas. Pode acontecer que a maioria das avarias ocorram no fim da semana de trabalho e o tempo disponível para resolver é diferente do início da semana, podendo não ter o tempo necessário para reparar as avarias que ocorreram na mesma semana. Uma alternativa para contornar situações destas é limitar o número de ordens pendentes de manutenção, neste caso, através das avarias. Como tal, considera-se a seguinte restrição:

$$x_{t,p}^n \leq k \times a_{t,p}^n, \quad t \in T_m, \quad n = d+1, \dots, D \quad p \in P$$

onde $k > 0$ pode ser interpretado como o número de semanas em que é tolerável manter as novas ordens pendentes de manutenção por reparar.

Neste modelo pretende-se minimizar, em primeiro lugar, o número de equipas necessárias e, secundariamente, a percentagem de equipas sem trabalhar.

$$\min \sum_{p=1}^{12} \left(\sum_{n=1}^{D-d+1} c_p^n + 0.00001 \times \sum_{t=1}^5 \sum_{n=1}^D \left(\frac{T^n}{tempo_{t,p}} \times f_{t,p}^n - r_{t,p}^n \right) \right),$$

dando um maior ênfase à minimização do número de novas equipas disponíveis.

5.1.1 Aplicação do modelo

Efetuada as alterações anteriores no Modelo M1.3, obtém-se o modelo M2. Este modelo foi colocado no CPLEX e executado com os dados da EDP Distribuição relativos ao final de 2018 para vários valores do parâmetro, k . Inicialmente, começa-se por considerar k igual a 1, sendo este o número natural que obriga a que existam mais equipas novas disponíveis para os diferentes k possíveis a considerar e, ainda permite que posteriormente seja possível comparar com a solução anterior proposta. O novo modelo proposto é mais fácil de resolver, tendo o CPLEX demorado apenas alguns minutos para obter a solução ótima e que está representada na Figura 5.1.

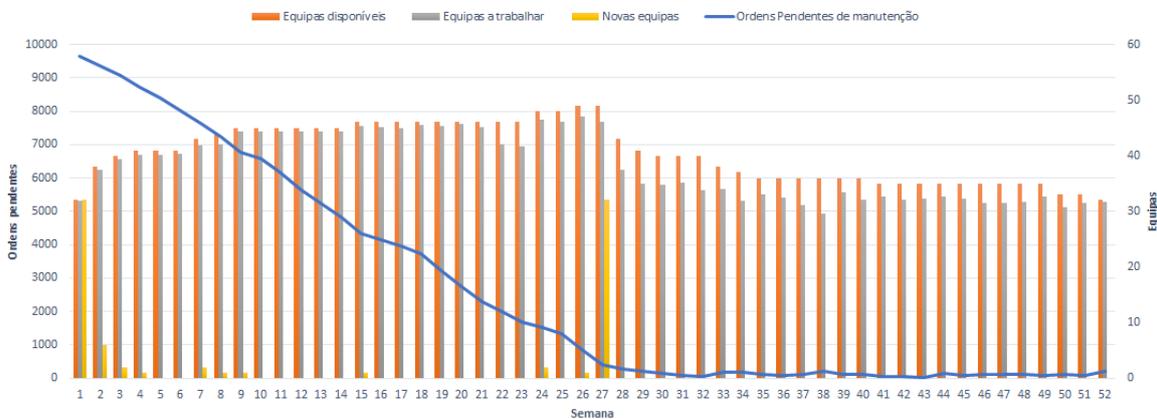


Fig. 5.1 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2, com $k = 1$.

O número de equipas necessárias ao longo do período de estudo em todas as empresas é 81, registando-se um aumento de 2 equipas comparativamente com solução do modelo M1.3. O facto de resolver um maior número de ordens pendentes mais cedo que o modelo anterior, implica um aumento do número de equipamentos funcionais e consequentemente o número de avarias aumenta. Neste sentido, serão necessárias mais equipas para as resolver.

A percentagem de equipas sem trabalhar é de 5,85%, ligeiramente superior ao limite pré-estabelecido. Nesta solução, o número de ordens pendentes na última semana é 195, correspondendo apenas a um valor médio de 16.25 ordens pendentes de manutenção (no conjunto dos três equipamentos) por empresa.

Para uma análise mais detalhada, poder-se-á observar o Anexo C, onde para cada empresa se apresenta graficamente o comportamento das ordens pendentes e o número de equipas semanalmente.

De forma a perceber a influência do valor k , apresenta-se na Figura 5.2 a solução do modelo M2, com $k = 4$. Esta solução necessita de 78 equipas e regista uma percentagem de equipas sem trabalhar de 3,93%, conseguida com a diminuição de uma equipa nas empresas 1, 2 e 7. A redução dos valores anteriores quando comparado com k inicial deve-se a uma maior tolerância de ordens pendentes de manutenção existente semanalmente. De facto, a região de soluções admissíveis neste modelo aumenta com o valor de k , e por consequência o valor de equipas necessárias tende a diminuir. Na Tabela 5.1 apresenta-se uma comparação mais detalhada da solução para $k = 1$ e $k = 4$.

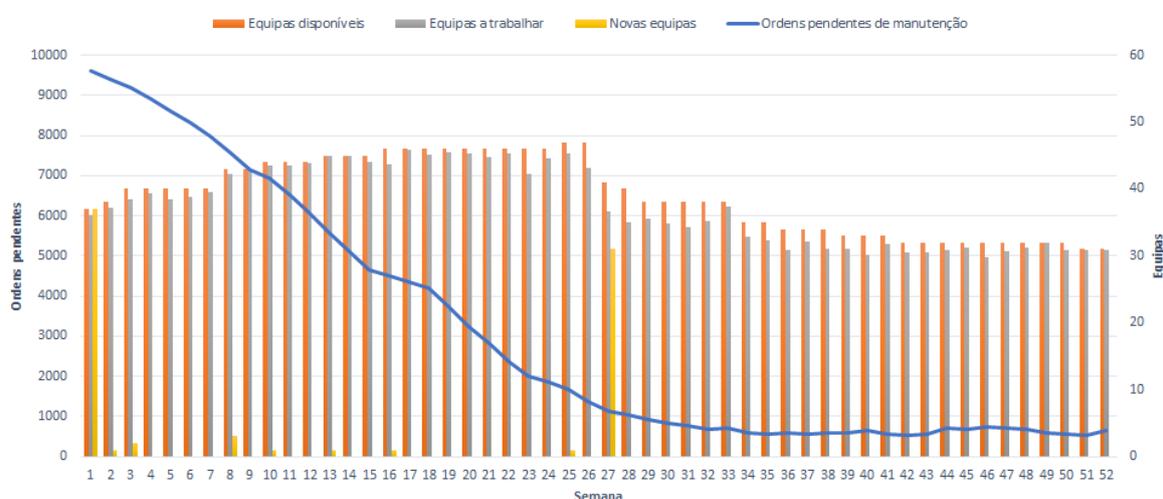


Fig. 5.2 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2, com $k = 4$.

A Tabela 5.1 permite também a comparação entre as soluções obtidas com o modelo M2 e a situação atual implementada na EDP Distribuição para cada empresa em estudo. As conclusões relativamente ao desempenho destas soluções são semelhantes às descritas no Capítulo 4, nomeadamente: o número de equipas necessárias é cerca de metade das descritas na situação atual e existem duas empresas (a empresa 5 e 6) que não apresentam o número de equipas necessárias para obter uma solução admissível para este modelo.

	Semana	Empresa														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
Solução proposta pelo modelo M2 para $k = 1$																
Equipas disponíveis para 2019		8	4	5	10	10	6	10	2	5	9	6	6			
Equipas disponíveis	1	3	1	3	4	4	2	1	3	5	6	4	2			
	2		2		6	5	6							5	4	
	3					4										7
	4-6	4	3	6	4		6	3	4							
	7					5				4	5	6	3	4		
	8	3	4	5	6		3	4								
	9-14					5			2	4	5	3	4			
	15-23	3	2	4	4		2	3								
	24-25					4			2	4	4	2	3			
	26	5	2	4	4		2	3								
	27					3			2	4	4	2	3			
	28	4	2	4	4		2	3								
	29					3			2	4	4	2	3			
	30-32	5	2	4	4		2	3								
	33					3			2	4	4	2	3			
	34	4	2	4	4		2	3								
	35-40					3			2	4	4	2	3			
41-49	4	2	4	4	2		3									
50-51						3		2	4	4	2	3				
52	5	2	4	4	2		3									
Equipas sem trabalhar (%)								12.06	15.49	3.64	2.51	3.78	9.60	5.58	3.98	5.65
Solução proposta pelo modelo M2 para $k = 4$																
Equipas disponíveis para 2019		7	3	5	10	10	6	9	2	5	9	6	6			
Equipas disponíveis	1	3	1	3	4	5	3	5	1	3	6	3	2			
	2				6	6								4	5	4
	3-7															
	8-9	5	6	5	4	3										
	10-12						4	6	5	4	3					
	13-15	3	6	5	4	3										
	16-24						4	6	5	4	3					
	25-26	5	6	5	4	3										
	27						3	6	5	4	3					
	28	4	6	5	4	3										
	29-33						3	6	5	4	3					
	34-35	5	6	5	4	3										
	36-38						4	6	5	4	3					
	39-41	3	6	5	4	3										
	42-50						4	6	5	4	3					
	51-52	3	6	5	4	3										
	Equipas sem trabalhar (%)							2.74	7.09	4.32	2.82	3.69	9.95	0.24	4.72	5.58
Situação Atual																
Equipas disponíveis para 2019		*	*	12	38	4	4	14	4	8	16	34	18			
Equipas disponíveis por semana		*	*	6	19	2	2	7	2	4	8	17	9			

*A aguardar informação da respetiva empresa.

Tabela 5.1 Comparação entre as soluções do modelo M2 para $k = 1$ e $k = 4$ e a situação atual praticada pela empresa.

Relembrando a Tabela 4.6 e comparando-a com a Tabela 5.1 é possível observar as soluções obtidas pelos modelos M1.3 e M2. O primeiro necessita de menos equipas do que o segundo (considerando $k = 1$), porém, como existem mais equipas que as necessárias na situação atual, esse aumento não influencia a falta de recursos para a resolução de todas as ordens pendentes nas empresas.

No global, o número de equipas necessárias é maior nas últimas semanas d semanas no modelo M1.3,

enquanto que no modelo M2 o maior número de equipas disponíveis encontra-se nas primeiras d semanas. Assim, o modelo M2 apresenta a vantagem de ter um maior número de equipamentos funcionais num menor período de tempo, fazendo com que as recolhas de leituras efetuadas pelos equipamentos seja mais eficiente.

5.2 Curva de Pareto

Uma curva (ou fronteira) de Pareto é uma ferramenta de apoio à decisão que permite analisar o comportamento de dois ou mais critérios associados ao mesmo problema em simultâneo.

Na construção da curva de Pareto é utilizada a otimização multi-objetivo. Esta permite encontrar um conjunto de soluções ditas *eficientes* sendo o valor da função objetivo designado de pontos não-dominados. Estas soluções apresentam um compromisso entre os objetivos de forma que não é possível reduzir o valor de um dos critérios do problema sem que simultaneamente ocorra um aumento em pelo menos num dos restantes critérios.

Para o problema em questão, surge a necessidade de construir uma curva de Pareto para analisar o comportamento do número total de equipas utilizadas e o número total de ordens pendentes de manutenção com diferentes valores de k - ver Figura 5.3. Nesta figura observa-se que os dois critérios em análise são, em geral, conflituosos, uma vez que à medida que se aumenta o valor de k ficam por resolver mais ordens pendentes de manutenção mas também são necessárias menos equipas.

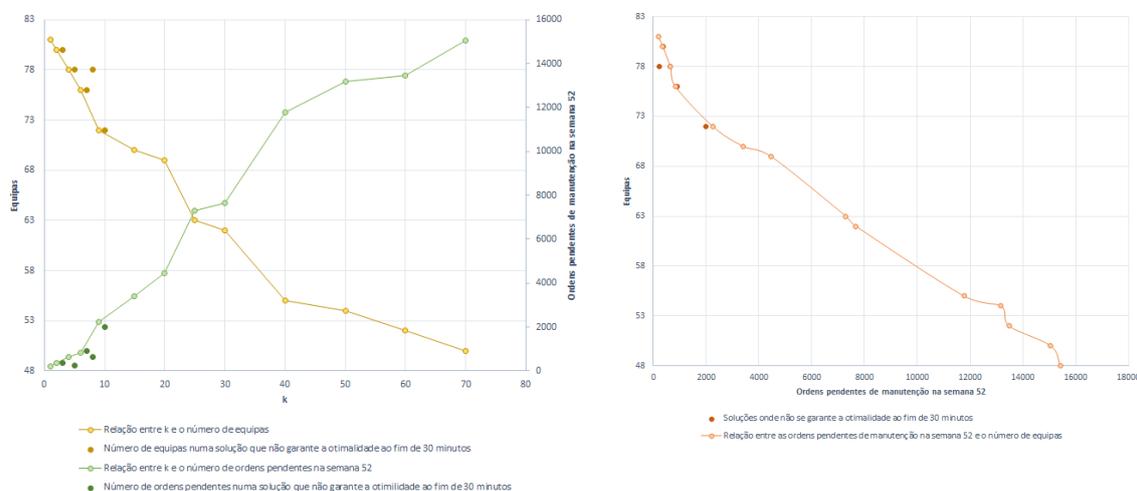


Fig. 5.3 Comparação entre o número de equipas e o número de ordens pendentes de manutenção no fim do período de estudo para os vários valores de k .

Os valores de k aqui considerados foram de 1 até 10 (com passo de 1 unidade), de 10 até 30 (com passo de 5 unidades) e de 30 até 70 (com passo de 10 unidades). Note-se que os últimos valores inseridos de k poderão não fazer sentido no contexto do problema. No entanto, ajudam a desenhar as curvas de Pareto de forma mais detalhada.

Observando com mais pormenor os gráficos encontram-se pontos mais escuros, que correspondem a soluções nas quais não se conseguiu obter um gap de 0% ao executar o programa. Contudo, o gap

obtido nas soluções é inferior a 7%, pelo que essas soluções se encontram próximas das soluções ótimas, razão pela qual os pontos estão próximos da curva de Pareto.

A curva de Pareto apresentada na Figura 5.3 (direita) permite à EDP Distribuição escolher o número de semanas (k) que pode deixar em "stand-by" as avarias dos equipamentos tendo em conta o número de equipas necessárias disponíveis e o número de ordens pendentes no final do período de estudo.

5.3 Heurística H2

De modo análogo ao efetuado na Secção 4.2, também para o segundo modelo foi feita uma heurística denotada por H2. Como já referido, uma heurística devolve uma solução que permite satisfazer as restrições impostas, no entanto, não se trata da solução otimizada, esperando resultados piores que a solução obtida pelo modelo M2.

O código utilizado para a construção da solução heurística é idêntico ao descrito em 4.2. A diferença principal é que se pretende resolver as ordens pendentes de manutenção nas d primeiras semanas e se considera que as avarias ocorridas na semana n são reparadas na semana $n + k$. De forma a comparar as soluções devolvidas pelo modelo M2 e a heurística H2, executou-se o código do MATLAB com os mesmos dados da EDP Distribuição para os valores de k igual a 1 e a 4.

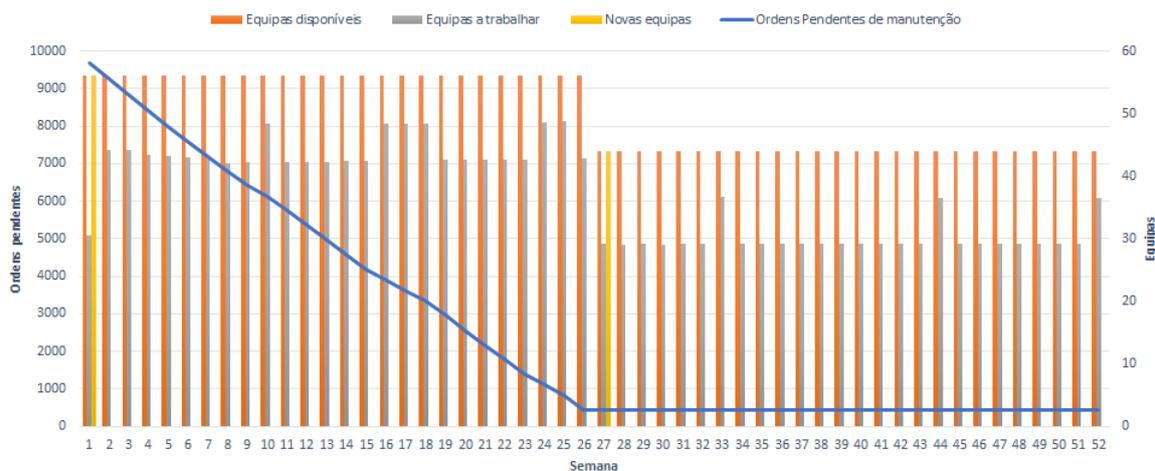


Fig. 5.4 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução heurística H2, com $k = 1$.

A Figura 5.4 ilustra o comportamento global das 12 empresas relativamente às equipas e às ordens pendentes de manutenção quando aplicada a heurística H2 para k igual a 1. Na figura é possível observar que nas primeiras d semanas o número de equipas necessárias é maior que no período seguinte, uma vez que a maioria das ordens pendentes de manutenção irá ser todas reparadas no primeiro período.

Tendo em conta a estratégia utilizada na definição de heurística, as avarias da primeira semana apenas são reparadas na semana seguinte, conduzindo ao aumento observado inicialmente para o número de ordens pendentes de manutenção.

A solução desenvolvida pela heurística H2, neste caso, necessita de 100 equipas para conseguir resolver as ordens pendentes ao longo do período de estudo, tendo uma percentagem de equipas sem

trabalhar de 26,31%. Relembrado a solução apresentada na Figura 5.1 devolvida pelo modelo M2, a solução devolvida pela heurística H2 necessita de mais 19 equipas. No entanto, quando comparado com a situação atual implementada na empresa, os resultados diferem em cerca de 30%, mantendo-se a necessidade de mais equipas na situação atual nas empresas 5 e 6 - ver Tabela 5.2.

O papel que o parâmetro k desempenha faz com que as avarias que vão surgindo associadas aos equipamentos fiquem por reparar durante k semanas, e portanto quanto maior for o parâmetro maior será o número de equipamentos que ficarão por reparar no final do período de estudo. Este facto pode ser observado na Figura 5.5, onde se apresenta a solução obtida para $k = 4$, situação em que as avarias irão estar por resolver durante aproximadamente um mês.

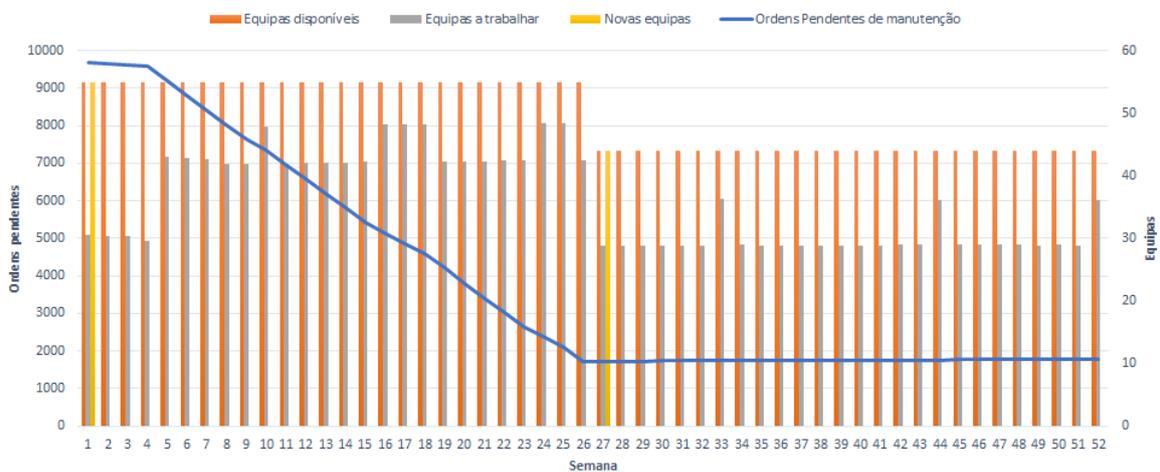


Fig. 5.5 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução heurística H2, com $k = 4$.

A solução necessita de 99 equipas e apresenta uma percentagem de equipas sem trabalhar ao longo do tempo de 27,78%. A linha correspondente às ordens pendentes de manutenção traduz o valor de k , que sendo este agora igual a 4, faz com que nas primeiras 4 semanas as reparações sejam apenas feitas aos equipamentos que já se encontravam avariados no início do período de estudo. Após a semana d , as ordens pendentes voltam a ter um comportamento constante, sendo este valor maior do que quando considerado para k igual a 1, como se poderá constatar na Figura 5.4.

Comparando as soluções globais para os dois valores de k analisados observa-se que de facto, ocorreu a diminuição do número de equipas. No entanto, apenas uma das empresas sofreu essa alteração em uma equipa. Esta diminuição lenta ocorre porque a heurística considera em cada semestre o máximo de equipas utilizadas, ou seja, mesmo que nas primeiras semanas não sejam precisas tantas equipas a trabalhar, estas serão precisas nas semanas seguintes. Assim, para valores pequenos de k o número de equipas não se diferencia tanto, comparativamente às soluções obtidas pelo modelo M2.

Semana	Empresa												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Solução proposta da heurística H2 com $k=1$													
Equipas disponíveis para 2019	9	4	7	12	12	8	12	4	7	11	8	6	
Equipas disponíveis	1-26	5	2	4	7	7	5	6	2	4	7	4	3
	27-52	4	2	3	5	5	3	6	2	3	4	4	3
Equipas sem trabalhar(%)	23.0	34.2	32.9	19.3	20.6	34.5	23.6	53.4	34.5	20.7	30.7	15.1	
Solução proposta da heurística H2 com $k=4$													
Equipas disponíveis para 2019	9	4	7	12	12	8	12	4	6	11	8	6	
Equipas disponíveis	1-26	5	2	4	7	7	5	6	2	3	7	4	3
	27-52	4	2	3	5	5	3	6	2	3	4	4	3
Equipas sem trabalhar(%)	26.3	36.9	34.3	21.1	22.4	36.2	25.8	55.7	27.4	23.1	32.3	17.3	
Situação Atual													
Equipas disponíveis para 2019	*	*	12	38	4	4	14	4	8	16	24	18	
Equipas a trabalhar por semana	*	*	6	19	2	2	7	2	4	8	17	9	

*A aguardar informação da respetiva empresa.

Tabela 5.2 Comparação entre as soluções da heurística H2 para valores de $k = 1$ e $k = 4$ e a situação atual praticada pela empresa.

Através da Tabela 5.2 é possível verificar o comportamento do número de equipas nas soluções obtidas pela heurística para cada empresa, comparando-as com a situação atual. Observando as empresas que não sofreram alteração do número de equipas nas duas soluções devolvidas pela heurística H2, constata-se que para o valor de k mais elevado a percentagem de equipas sem trabalhar é maior. Como se está a trabalhar com uma solução idêntica à situação atual, onde as frações de equipas associadas a cada tarefa é praticamente "estática", o número de equipas disponíveis não irá variar de forma muito significativa. No entanto, o aumento de k faz com que sejam reparadas menos equipamentos e portanto a percentagem de equipas sem trabalhar aumenta.

As conclusões relativas à situação atual são as mesmas que anteriormente, mesmo quando aplicando a heurística H2. As empresas denominadas 5 e 6 não disponibilizam equipas suficientes, continuando as restantes empresas com equipas excedentárias.

5.4 Simulador

5.4.1 Simulação da solução do modelo M2

Quando analisado o modelo M1.3, surgiu a necessidade de estudar valores diferentes para as avarias, uma vez que a formulação do problema considera o valor médio das mesmas com base na taxa de avaria e do número de equipamentos funcionais, o que nem sempre ocorre. A mesma necessidade surge agora para a formulação matemática apresentada neste capítulo. Assim, de forma análoga à já efetuada, simulam-se valores novos para as avarias, sendo $a_{t,p}^n$ substituído por $aa_{t,p}^n$ um valor aleatório compreendido entre $[0; 2 \times a_{t,p}^n]$. Os valores dos intervalos são apenas exemplificativos e podem ser alterados caso se verifique que as avarias tomam um determinado comportamento, assim como o lei das mesmas, que neste caso se considera uma lei uniforme.

Relembra-se que o intuito do simulador é perceber como se comporta a solução devolvida quando as avarias são diferentes do esperado, pretendendo-se agora verificar a solução do modelo M2.

Anteriormente analisou-se que o valor de k menor é o que necessita de mais equipas comparativamente

aos restantes. Por esse motivo, a simulação das avarias e posterior análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção é feita considerando a solução proposta pelo modelo M2 quando k é igual a 1, podendo o mesmo procedimento ser feito para outros valores de k .

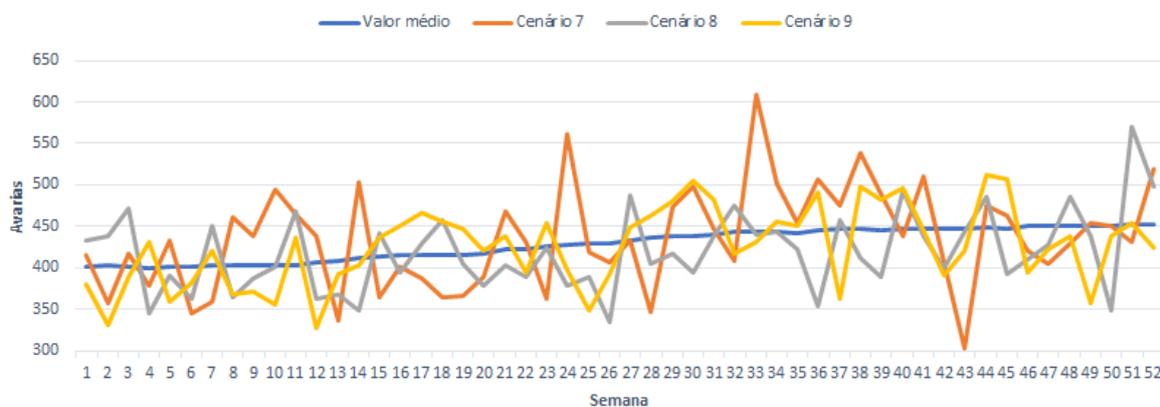


Fig. 5.6 Comparação entre o valor médio do total das avarias semanais e o número de avarias simuladas em três cenários distintos com o modelo M2 considerando $k = 1$.

Com o mesmo código utilizado nas simulações anteriores, começa-se por observar o comportamento de três cenários simulados para as avarias semanalmente, expostas na Figura 5.6. Salienta-se que para cada simulação são gerados sempre valores aleatórios diferentes, sendo possível verificar as oscilações das linhas dos diferentes cenários. Ver-se-á de seguida como reagem as ordens pendentes de manutenção às alterações feitas nas avarias.

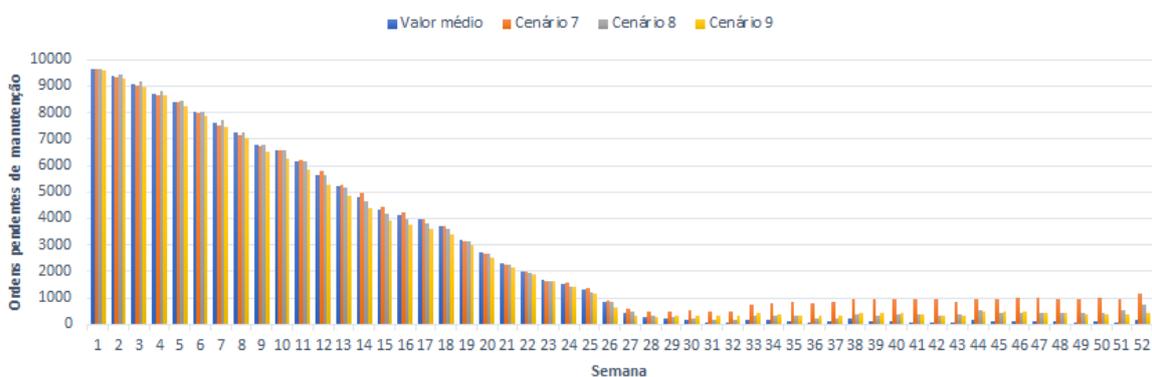


Fig. 5.7 Análise das ordens pendentes de manutenção de todas as empresas no caso de se considerar o valor médio de avarias e nos três cenários simulados na solução do modelo M2 considerando $k = 1$.

Semanalmente as ordens pendentes são resolvidas através das equipas disponíveis dadas pela proposta de solução do modelo M2. No entanto, quando as avarias aumentam mais que o previsto, verifica-se que ocorrem ordens pendentes que não conseguem ser resolvidas porque necessitam de mais equipas que as disponíveis. Isto acontece porque a percentagem inicial de equipas sem trabalhar é muito baixa. No cenário 7 existem alguns períodos nos quais ocorrem mais avarias e portanto surgem mais ordens pendentes para resolver. Estes aumentos de ordens pendentes de manutenção podem ser atenuados se as avarias surgirem em menor número do que previsto em algumas semanas, uma vez que se utilizará sempre as equipas disponíveis para reparar as avarias. Neste cenário tal não acontece, uma vez que a

quantidade de avarias superiores ao valor médio é maior que o inferior.

Nos três cenários expostos, os resultados finais com a aplicação da solução anteriormente encontrada, segue-se na Tabela 5.3.

	Média de avarias ao longo do período de estudo	Ordens pendentes de manutenção no final do período de estudo	Percentagem de equipas sem trabalhar
Valor médio	428,65	195	5,85%
Cenário 7	435,83	1162	2,98%
Cenário 8	419,12	718	4,11%
Cenário 9	425,50	453	3,18%

Tabela 5.3 Comparação entre a média de avarias, o número de ordens pendentes de manutenção e a percentagem de equipas sem trabalhar ao longo do período de estudo quando utilizada a solução do modelo M2 com $k = 1$ no caso do valor médio e nos três cenários gerados aleatoriamente.

Nos três cenários apresentados o número de ordens pendentes no final do período de tempo é superior às 195 ordens pendentes de manutenção dadas pela solução implementada pelo modelo M2, concluindo-se que maioritariamente quando as avarias tomam valores diferentes do esperado as ordens pendentes de manutenção na semana 52 são maiores do que as esperadas. Em contrapartida, as equipas estão mais tempo a trabalhar, uma vez que nos três cenários existe uma percentagem de equipas sem trabalhar menor do que a inicial. Este facto deve-se à possibilidade de aproveitamento das equipas quando existem ordens de manutenção por resolver, independentemente da semana.

5.4.2 Simulação da solução heurística H2

De seguida, faz-se a simulação da solução heurística H2. Desta forma, como em 5.4.1, serão simulados valores para substituir as avarias que seguem uma lei $U[0; 2 \times a_{i,p}^n]$.

A Figura 5.8 ilustra os diferentes valores simulados em cada semana para o total de avarias em três cenários distintos.

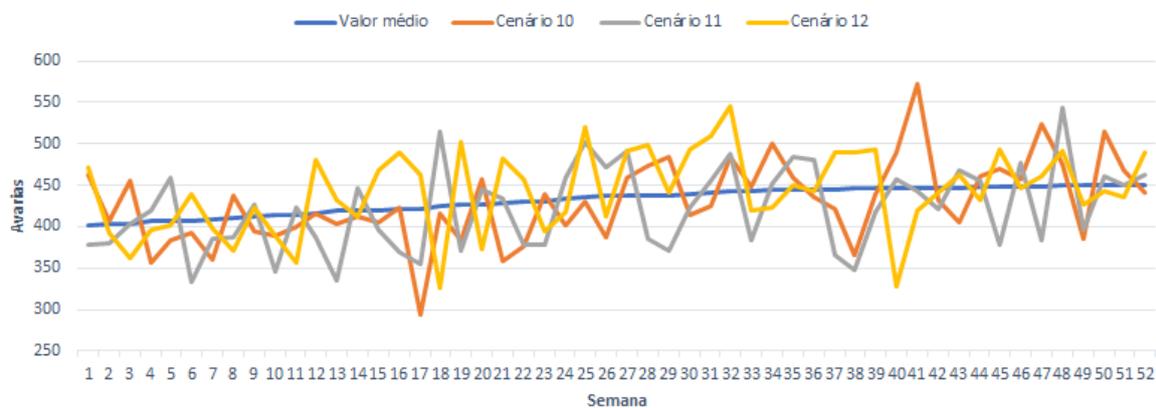


Fig. 5.8 Comparação entre o valor médio do total de avarias semanais e o número de avarias simuladas em três cenários distintos com a heurística H2 considerando $k = 1$.

As novas avarias influenciam o comportamento das ordens pendentes de manutenção semanalmente, como indicado na Figura 5.9.

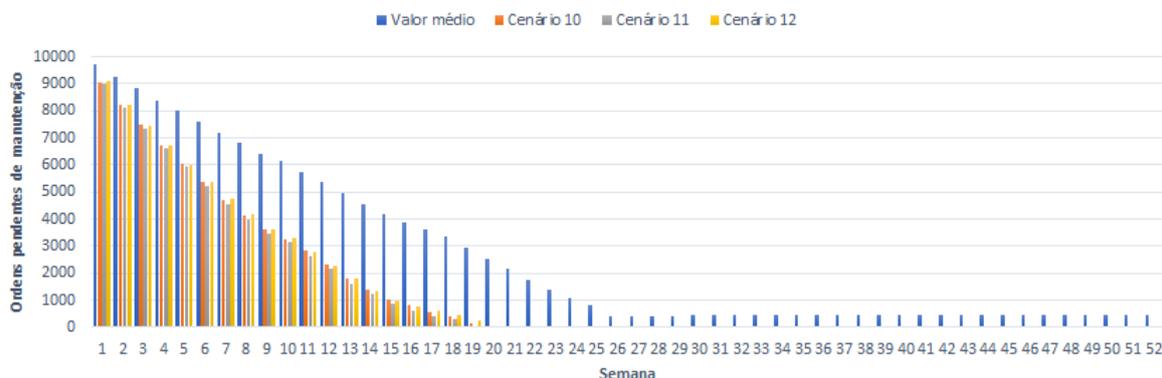


Fig. 5.9 Análise das ordens pendentes de manutenção de todas as empresas no caso de se considerar o valor médio de avarias e nos três cenários simulados na solução heurística H2 considerando $k = 1$.

Analisando o gráfico anterior, conclui-se que o número de ordens pendentes de manutenção nos três cenários decresce mais depressa que no caso da heurística, tendo um comportamento quase nulo a partir de semana 20 quando comparado com a linha azul. Observando com maior detalhe (Figura 5.10) constata-se que existem ordens pendentes de valores reduzidos. Esta redução deve-se ao aproveitamento de equipas disponíveis devolvidas pela heurística. Assim, como existe uma elevada percentagem de equipas sem trabalhar nas primeiras semanas estas são alocadas para reparar mais avarias que as previstas pela heurística, fazendo com que esse número decresça mais rapidamente.

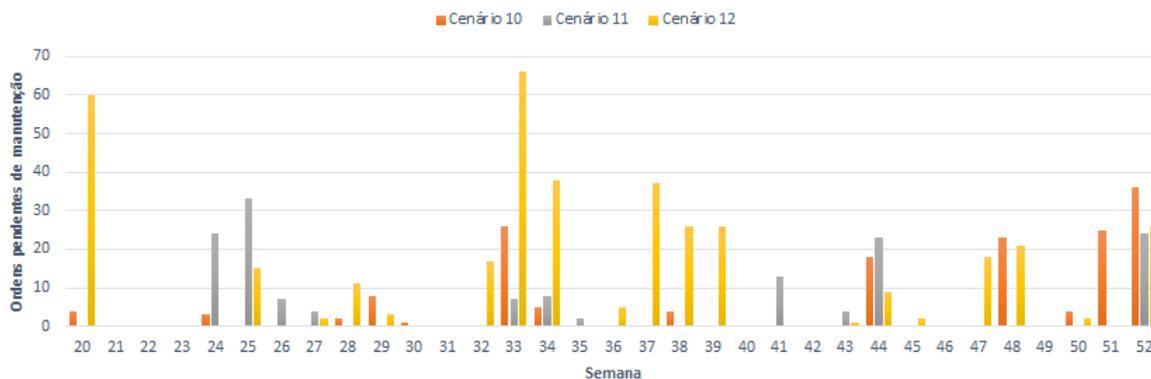


Fig. 5.10 Análise das ordens pendentes de manutenção de todas as empresas nas últimas semanas do período de estudo nos três cenários simulados da solução heurística H2 considerando $k = 1$.

Observando as Figuras 5.9 e 5.10 percebe-se que quando existam mais avarias do que as previstas (geradas pelo simulador), na maioria, serão facilmente resolvidas devido à grande percentagem de equipas supostamente sem trabalhar. Ter-se-á uma melhor perceção através da Tabela 5.4.

	Média de avarias ao longo do período de estudo	Ordens pendentes de manutenção no final do período de estudo	Percentagem de equipas sem trabalhar
Valor médio	431,9	450	26,31%
Cenário 10	429,96	36	25,86%
Cenário 11	421,92	24	26,23%
Cenário 12	442,15	26	25,11%

Tabela 5.4 Comparação entre a média de avarias, o número de ordens pendentes de manutenção e a percentagem de equipas sem trabalhar ao longo do período de estudo quando utilizada a solução heurística H2 com $k = 1$ no caso do valor médio e nos três cenários gerados aleatoriamente.

Como observado na Figura 5.7 as ordens pendentes de manutenção dos cenários diminuem mais rapidamente comparativamente com própria heurística. O que diminui igualmente são as percentagens de equipas sem trabalhar nos os três cenários. No entanto, cerca de um quarto de equipas continua sem trabalhar. Este resultado leva a concluir que com a solução proposta pela heurística mesmo que ocorram mais avarias que o previsto é possível obter uma solução idêntica à espera ou até melhorada. Salienta-se que se está a considerar a soma das ordens pendentes de manutenção dos três tipos de equipamentos para as doze empresas distintas, pelo que alguns equipamentos terão todas as ordens de manutenção resolvidas na última semana.

Capítulo 6

Conclusão

A necessidade de encontrar um modelo matemático que permita dar resposta a um problema prático foi a principal motivação deste trabalho. Além disso, a implementação de todos os códigos referidos neste trabalho permitiu-me aplicar todo o estudo aqui realizado num contexto real. A matemática tem, sem dúvida, aplicação prática em todo o nosso quotidiano, mas conseguir conciliar este facto com a dissertação, tornou este trabalho ainda mais desafiante e motivador sendo, no meu ponto de vista, uma mais-valia poder adicionar um estágio na realização da mesma.

Problemas como os que são tratados neste trabalho surgem cada vez mais na organização das empresas no sentido de otimizar as suas necessidades. Desta forma, o conteúdo desenvolvido releva-se pertinente na atual conjuntura. É o que acontece no caso da EDP Distribuição aqui retratado, no qual se pretende dar resposta a um problema real e atual.

Importa salientar que os modelos aqui analisados poderão ter aplicabilidades mais vastas para além do caso aqui apresentado, conforme constatado no Capítulo 3.

Os modelos aqui desenvolvidos têm em conta duas estratégias de atuação definidas pela EDP Distribuição. Na primeira estratégia, pretende-se resolver o máximo de ordens pendentes ao longo do período de tempo, enquanto que na segunda estratégia é imposto um limite máximo para as ordens pendentes de manutenção que deve ser cumprido a partir de um certo instante.

As soluções dos modelos foram obtidas com recurso a dados reais fornecidos pelas empresas tendo sido apresentadas à EDP Distribuição. Foi possível concluir que estas soluções apresentam ganhos significativos, quer no número de equipas necessárias, quer no número de ordens pendentes de manutenção que ficam por resolver. Estes ganhos resultam do aumento de opções para a disponibilização de novas equipas e da associação de frações de equipas a trabalhar por semana em cada tarefa ser feita de forma dinâmica.

As vantagens e desvantagens dos dois modelos foram discutidas com a empresa, tendo esta optado por implementar no futuro a solução relativa ao segundo modelo.

Observando a solução devolvida pelo modelo M2 durante o segundo semestre, é possível ter uma aproximação das equipas necessárias para manter o plano de trabalho nos próximos tempos. Note-se que esta aproximação apenas deve ser considerada caso o número total de ordens pendentes (manutenção e instalação) a realizar semanalmente se mantiver igual.

Os próximos passos previstos passam por adquirir um software de otimização (SAS Optimization) pela empresa de forma a poder aplicar a solução no futuro com novos dados. A logística para obtenção do

software é um processo demorado e requer a disponibilidade de recursos humanos experientes com o sistema. Deste modo, desenvolveram-se heurísticas que permitiram determinar soluções aproximadas para cada um dos modelos e que poderão ser executadas com o software atualmente disponível na empresa.

Alguns dos parâmetros considerados para a criação dos modelos ainda se consideram em fase de estudo, como é o caso das taxas de avaria correspondentes a cada equipamento. O histórico existente é muito reduzido, impossibilitando uma melhor perceção do comportamento das taxas de avaria de forma a possibilitar uma previsão mais rigorosa das mesmas. Para avaliar o comportamento das soluções obtidas com os modelos e as heurísticas em cenários mais realistas, foi desenvolvido um simulador que permite gerar aleatoriamente o número de avarias em cada semana. Deste modo, foi possível observar que o número de ordens pendentes de manutenção na última semana fica próximo do pretendido, mesmo que o número de avarias semanal seja diferente do previsto.

Como trabalho futuro, pretende-se utilizar os dados históricos existentes relativamente às avarias semanais, de forma a conseguir prever com mais detalhe as avarias. A título de exemplo, pode ocorrer que as taxas de avaria sejam dependentes das zonas geográficas, e portanto, pode ser necessário utilizar diferentes taxas de avaria por empresa. Um outro fator que poderá ser algo de averiguação é a marca de cada equipamento, levando a que se tenha de considerar diferentes taxas de avarias em função de cada marca.

Em suma, a EDP Distribuição com a situação atualmente implementada, apresenta um número de equipas (mais que) suficiente para implementar as duas estratégias modeladas neste trabalho. As alterações a efetuar estão relacionadas com a alocação de equipas em cada empresa e na forma como estas estão alocadas semanalmente a cada tarefa.

Bibliografia

- [1] A. Carvalho, J. D. (2000). Capítulo ii - planeamento e controlo de produção. http://pessoais.dps.uminho.pt/jdac/apontamentos/Cap02_SisPPC.pdf. [Online; acedido em 27.03.2019].
- [2] Brito da Silva, J. P. and Veríssimo Lisboa, J. (2000). Planeamento agregado da produção: uma revisão da literatura. *Estudos de Gestão - Portuguese Journal of Management Studies*, 1:1–14.
- [3] Catalão Machado, A. R. (2018). Serviços e operações das redes inteligentes: Inovgrid - qualidade e desempenho – estágio na edp distribuição. [Relatório de estágio].
- [4] Cherkaoui, H., Godichaud, M., and Amodeo, L. (2015). Multi-objective capacitated disassembly scheduling with lost sales.
- [5] EDP Distribuição (2017). A edp distribuição - quem somos. <https://www.edpdistribuicao.pt/pt/edpDistribuicao/Pages/aEDPDistribuicao.aspx>. [Online; acedido em 15.12.2018].
- [6] Empresa de Eletricidade da Madeira (2018). Postos de transformação. <http://www.eem.pt/pt/conteudo/sistema-el%C3%A9trico/distribui%C3%A7%C3%A3o/postos-de-transforma%C3%A7%C3%A3o/>. [Online; acedido em 20.12.2018].
- [7] Ferreira Silva, L. and Fernandes de Castro, T. (2016). Plan de production et l’optimisation du flux financier avec l’optimisation robuste. Master’s thesis.
- [8] IBM® IBM Knowledge Center (2015). Branch and cut in cplex. https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSSA5P_12.6.2/ilog.odms.cplex.help/refcpcplex/html/branch.html. [Online; acedido em 13.12.2018].
- [9] Martins, P. and Paula Quelhas, A. (2016). Workforce planning and financing on a production/capital discrete-time model. *Centro de Investigação Operacional - Working-Papers*, 23:507–538.
- [10] Mirzaesmaeeli, H., Elkamel, A., Douglas, P. L., Croiset, E., and Gupta, M. (2010). A multi-period optimization model for energy planning with co2 emission consideration. *Journal of Environmental Management*, 91:1063–1070.
- [11] Niu, S.-C. (2003). A production planning problem. <https://www.utdallas.edu/~scniu/OPRE-6201/documents/LP01-Production-Planning.pdf>. [Online; acedido em 15.01.2019].
- [12] Pochet, Y. and Wolsey, L. A. (2006). *Production Planning by Mixed Integer Programming*. Springer.

Anexo A

Código dos programas de MATLAB

A.1 Heurística

```
1 function partel_heuristica
2
3 %Leitura de dados do problema
4 tempo = xlsread('parte2.xlsx',1, 'C2:N6');
5 x_0 = xlsread('parte2.xlsx',1, 'C7:N11');
6 total = xlsread('parte2.xlsx',1, 'C12:N14');
7 taxa = xlsread('parte2.xlsx',1, 'C17:C19');
8 T = xlsread('parte2.xlsx',1, 'B29:BA29');
9 d = xlsread('parte2.xlsx',1, 'C21');
10 D = xlsread('parte2.xlsx',1, 'C22');
11
12 a=zeros(3,12,D);
13 r=zeros(5,12,D);
14 r_aux=zeros(3,12,D);
15 x=zeros(5,12,D+1);
16 f=zeros(5,12,D);
17 f_aux=zeros(5,12,D);
18 f_aux2=zeros(3,12,d);
19 f_aux3=zeros(3,12,D);
20 tempo_aux=zeros(3,12);
21 total_3=zeros(12,D);
22 equipa=zeros(12,D);
23 f1=zeros(5,12,d);
24 f2=zeros(5,12,d);
25 aux=zeros(5,12,d);
26 f1_aux=zeros(5,12,d);
27 f2_aux=zeros(5,12,d);
28 f1_aux3=zeros(3,12,d);
29 f2_aux3=zeros(3,12,d);
30
31 %Ordens pendentes de instalacao
32 for p=1:12
33     for t=4:5
34         x(t,p,1)=x_0(t,p);
35         for n=1:D
36             if x(t,p,n)~=0
37                 r(t,p,n)=ceil(x(t,p,n)/(D+1-n));
38                 if n==1
39                     x(t,p,n)=x_0(t,p)-r(t,p,n);
40                 else
```

```

41         x(t,p,n)=x(t,p,n-1)-r(t,p,n);
42     end
43     if n<D
44         x(t,p,n+1)=x(t,p,n);
45     end
46 end
47 f_aux(t,p,n)=r(t,p,n)*tempo(t,p)/T(n);
48 if n<=d
49     f1_aux(t,p,n)=r(t,p,n)*tempo(t,p)/T(n);
50 else
51     f2_aux(t,p,n-d)=r(t,p,n)*tempo(t,p)/T(n);
52 end
53 end
54 end
55 end
56
57 for n=1:D
58     if n<=d
59         f(:,n)=max(f1_aux,[],3);
60     else
61         f(:,n)=max(f2_aux,[],3);
62     end
63 end
64 e=max(sum(f,[],3);
65 f_sobra=e-sum(f_aux);
66
67 %Ordens pendentes de manutencao
68 for p=1:12
69     for t=1:3
70         tempo_aux(t,p)=tempo(t,p);
71     end
72 end
73 while ~isequal(tempo_aux,zeros(3,12))
74     [m,i]=max(tempo_aux);
75     for p=1:12
76         for n=1:D
77             x(i(p),p,1)=x_0(i(p),p);
78             if x(i(p),p,n)~=0
79                 r(i(p),p,n)=min(x(i(p),p,n),floor(f_sobra(1,p,n)*T(n)/tempo(i(p),p)));
80                 if n==1
81                     x(i(p),p,n)=x_0(i(p),p)-r(i(p),p,n);
82                 else
83                     x(i(p),p,n)=x(i(p),p,n-1)-r(i(p),p,n);
84                 end
85                 x(i(p),p,n+1)=x(i(p),p,n);
86             end
87             f_aux(i(p),p,n)=r(i(p),p,n)*tempo(i(p),p)/T(n);
88             f(i(p),p,n)=f_aux(i(p),p,n);
89             aux(1,p,n)=f(i(p),p,n);
90             for t=1:5
91                 f(t,p,n)=max(f_aux(t,p,n),f(t,p,n)-aux(t,p,n));
92                 aux(t+1,p,n)=max(0,aux(t,p,n)-(f(t,p,n)-f_aux(t,p,n)));
93             end
94             f_sobra(1,p,n)=f_sobra(1,p,n)-f_aux(i(p),p,n);
95         end
96     for n=1:D
97         if x(i(p),p,D+1)~=0
98             r_aux(i(p),p,n)=ceil(x(i(p),p,D+1)/(D+1-n));
99             r(i(p),p,n)=r(i(p),p,n)+r_aux(i(p),p,n);
100            x(i(p),p,n)=x(i(p),p,n)-r_aux(i(p),p,n);

```

```

101         x(i(p),p,D+1)=x(i(p),p,D+1)-r_aux(i(p),p,n);
102     end
103     f_aux2(i(p),p,n)=r_aux(i(p),p,n)*tempo(i(p),p)/T(n);
104     f_aux(i(p),p,n)=f_aux(i(p),p,n)+f_aux2(i(p),p,n);
105 end
106 for n=1:D
107     f(i(p),p,n)=f(i(p),p,n)+max(f_aux2(i(p),p,:),[],3);
108     f_sobra(1,p,n)=f_sobra(1,p,n)+(max(f_aux2(i(p),p,:),[],3)-f_aux2(i(p),p,n));
109 end
110 tempo_aux(i(p),p)=tempo_aux(i(p),p)-m(p);
111 end
112 end
113
114 for p=1:12
115     for t=1:3
116         for n=1:D
117             %Avarias
118             if t==3
119                 if n==1
120                     total_3(p,n)=total(t,p)+r(4,p,n);
121                     a(t,p,n)=round(taxa(t)*(total_3(p,n)-x_0(t,p)));
122                 else
123                     total_3(p,n)=total_3(p,n-1)+r(4,p,n);
124                     a(t,p,n)=round(taxa(t)*(total_3(p,n)-x(t,p,n-1)));
125                 end
126             else
127                 if n==1
128                     a(t,p,n)=round(taxa(t)*(total(t,p)-x_0(t,p)));
129                 else
130                     a(t,p,n)=round(taxa(t)*(total(t,p)-x(t,p,n-1)));
131                 end
132             end
133             r(t,p,n)=r(t,p,n)+a(t,p,n);
134             f_aux3(t,p,n)=a(t,p,n)*tempo(t,p)/T(n);
135             f_aux(t,p,n)=f_aux(t,p,n)+f_aux3(t,p,n);
136             if n<=d
137                 f1_aux3(t,p,n)=f_aux3(t,p,n);
138             else
139                 f2_aux3(t,p,n-d)=f_aux3(t,p,n);
140             end
141             %Ordens pendentes de manutencao
142             if n==1
143                 x(t,p,n)=x_0(t,p)+a(t,p,n)-r(t,p,n);
144             else
145                 x(t,p,n)=x(t,p,n-1)+a(t,p,n)-r(t,p,n);
146             end
147         end
148     for n=1:D
149         if n<=d
150             f(t,p,n)=f(t,p,n)+max(f1_aux3(t,p,:),[],3);
151         else
152             f(t,p,n)=f(t,p,n)+max(f2_aux3(t,p,:),[],3);
153         end
154     end
155 end
156 end
157
158 for n=1:D
159     if n<=d
160         f1(:, :, n)=f(:, :, n);

```

```
161     else
162         f2(:, :, n-d)=f(:, :, n);
163     end
164 end
165
166 for n=1:D
167     if n<=d
168         equipa(:, n)=ceil(max(sum(f1), [], 3));
169     else
170         equipa(:, n)=ceil(max(sum(f2), [], 3));
171     end
172 end
173
174 %Envio de informacao para o ficheiro 'parte2.xlsx'
175 for p=1:12
176     writematrix(x_0(:, p), 'parte2.xlsx', 'Sheet', p+1, 'Range', 'C2:C6');
177     writematrix(x(:, p, (1:D)), 'parte2.xlsx', 'Sheet', p+1, 'Range', 'D2:BC6');
178     writematrix(r(:, p, :), 'parte2.xlsx', 'Sheet', p+1, 'Range', 'D7:BC11');
179     writematrix(a(:, p, :), 'parte2.xlsx', 'Sheet', p+1, 'Range', 'D12:BC14');
180     writematrix(f_aux(:, p, :), 'parte2.xlsx', 'Sheet', p+1, 'Range', 'D15:BC19');
181     writematrix(equipa(p, :), 'parte2.xlsx', 'Sheet', p+1, 'Range', 'D22:BC22');
182 end
```

A.2 Simulador

```

1  function parte1_cplex_simulador
2
3  %Leitura de dados do problema
4  tempo = xlsread('parte1_cplex_simulador.xlsx',1, 'C2:N4');
5  x_0 = xlsread('parte1_cplex_simulador.xlsx',1, 'C7:N9');
6  T = xlsread('parte1_cplex_simulador.xlsx',1, 'B29:BA29');
7  D = xlsread('parte1_cplex_simulador.xlsx',1, 'C22');
8
9  f=zeros(3,12,D); %fracao de equipas a trabalhar
10 a=zeros(3,12,D); %valor medio de avarias
11 equipa=zeros(12,D); %Equipas disponiveis
12
13 %Leitura dos resultados obtidos no software CPLEX
14 for p=1:12
15     f((1:3),p,:)= xlsread('parte1_cplex_simulador.xlsx',p+1, 'D25:BC27');
16     f((4:5),p,:)= xlsread('parte1_cplex_simulador.xlsx',p+1, 'D31:BC32');
17     a(:,p,:)= xlsread('parte1_cplex_simulador.xlsx',p+1, 'D8:BC10');
18     equipa(p,:) = xlsread('parte1_cplex_simulador.xlsx',p+1, 'D23:BC23');
19 end
20
21 avaria=zeros(3,12,D); %valor aleatorio de avarias, compreendido entre [0,2*a]
22 r_simulador=zeros(3,12,D); %reparacoes efetuadas com a simulacao das avarias aproveitando
    as equipas disponiveis
23 raux_simulador=zeros(3,12,D); %reparacoes efetuadas com a simulacao das avarias
24 x_simulador=zeros(3,12,D); %ordens pendentes de manutencao com a simulacao das avarias
25 f_simulador=zeros(5,12,D); %fracao de equipas utilizada com a simulacao das avarias
26 f_sobra=zeros(12,D); %Diferenca entre a fracao de equipas disponiveis e as que estao a
    trabalhar
27
28 %Simulador
29 for n=1:D
30     for p=1:12
31         for t=1:3
32             avaria(t,p,n)=round(0+(2*a(t,p,n)-0).*rand(1,1));
33             if n==1
34                 raux_simulador(t,p,n)=min(max(0,floor(f(t,p,n)*T(n)/tempo(t,p))),x_0(t,p)+
                    avaria(t,p,n));
35                 x_simulador(t,p,n)=x_0(t,p)-raux_simulador(t,p,n)+avaria(t,p,n);
36             else
37                 raux_simulador(t,p,n)=min(max(0,floor(f(t,p,n)*T(n)/tempo(t,p))),
                    x_simulador(t,p,n-1)+avaria(t,p,n));
38                 x_simulador(t,p,n)=x_simulador(t,p,n-1)-raux_simulador(t,p,n)+avaria(t,p,n)
                    ;
39             end
40             f_simulador(t,p,n)=raux_simulador(t,p,n)*tempo(t,p)/T(n);
41         end
42         for t=4:5
43             f_simulador(t,p,n)=f(t,p,n);
44         end
45         f_sobra(p,n)=sum(equipa(p,n))-sum(f_simulador(:,p,n));
46     end
47 end
48
49 tempo_aux=tempo;
50 A(1:3,1:12)=10;
51
52 %Aproveitamento das equipas disponiveis que nao estao a trabalhar
53 while ~isequal(tempo_aux,A)

```

```

54     [m, i]=min(tempo_aux);
55     for n=1:D
56         for p=1:12
57             if n==1
58                 r_simulador(i(p),p,n)=min(raux_simulador(i(p),p,n)+floor(f_sobra(p,n)*T(n)/
59                     tempo(i(p),p)),x_0(i(p),p)+avaria(i(p),p,n));
60                 f_sobra(p,n)=f_sobra(p,n)-(r_simulador(i(p),p,n)-raux_simulador(i(p),p,n))*
61                     tempo(i(p),p)/T(n);
62                 x_simulador(i(p),p,n)=x_0(i(p),p)-r_simulador(i(p),p,n)+avaria(i(p),p,n);
63             else
64                 r_simulador(i(p),p,n)=min(raux_simulador(i(p),p,n)+floor(f_sobra(p,n)*T(n)/
65                     tempo(i(p),p)),x_simulador(i(p),p,n-1)+avaria(i(p),p,n));
66                 f_sobra(p,n)=f_sobra(p,n)-(r_simulador(i(p),p,n)-raux_simulador(i(p),p,n))*
67                     tempo(i(p),p)/T(n);
68                 x_simulador(i(p),p,n)=x_simulador(i(p),p,n-1)-r_simulador(i(p),p,n)+avaria(
69                     i(p),p,n);
70             end
71             f_simulador(i(p),p,n)=r_simulador(i(p),p,n)*tempo(i(p),p)/T(n);
72         end
73     end
74     for p=1:12
75         %Escrita dos resultados obtidos para o ficheiro 'parte1_cplex_simulador.xlsx'
76         writematrix(x_0(1:3,p), 'parte1_cplex_simulador.xlsx', 'Sheet',p+1, 'Range', 'C5:C7');
77         writematrix(x_simulador(:,p,:), 'parte1_cplex_simulador.xlsx', 'Sheet',p+1, 'Range', 'D5
78             :BC7');
79         writematrix(avaria(:,p,:), 'parte1_cplex_simulador.xlsx', 'Sheet',p+1, 'Range', 'D11:
80             BC13');
81         writematrix(r_simulador(:,p,:), 'parte1_cplex_simulador.xlsx', 'Sheet',p+1, 'Range', '
82             D17:BC19');
83         writematrix(f_simulador((1:3),p,:), 'parte1_cplex_simulador.xlsx', 'Sheet',p+1, 'Range'
84             , 'D28:BC30');
85     end

```

Anexo B

Gráficos - Relação do número de ordens pendentes de manutenção com o número de equipas em cada empresa na solução do modelo M1.3

De forma a detalhar com mais pormenor o comportamento de cada empresa separadamente ao longo das 52 semanas do ano 2019, seguem-se os gráficos que relacionam o número de ordens pendentes das tarefas de manutenção com o número de equipas disponíveis a trabalhar correspondentes ao modelo M1.3.

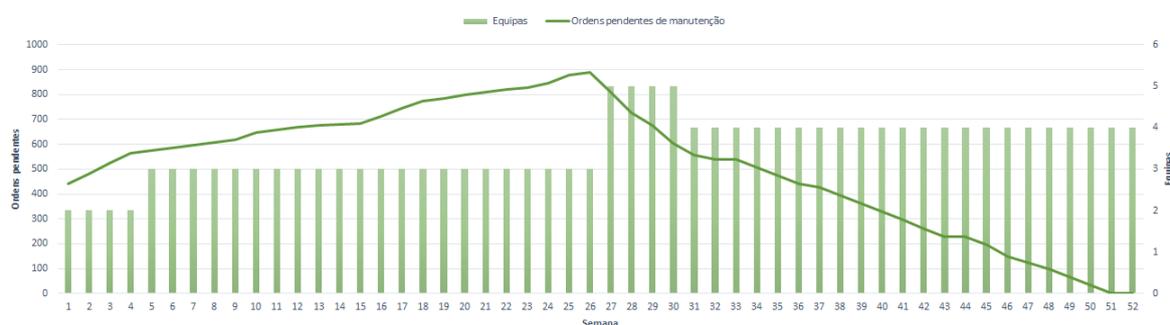


Fig. B.1 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 1.



Fig. B.2 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 2.



Fig. B.3 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 3.

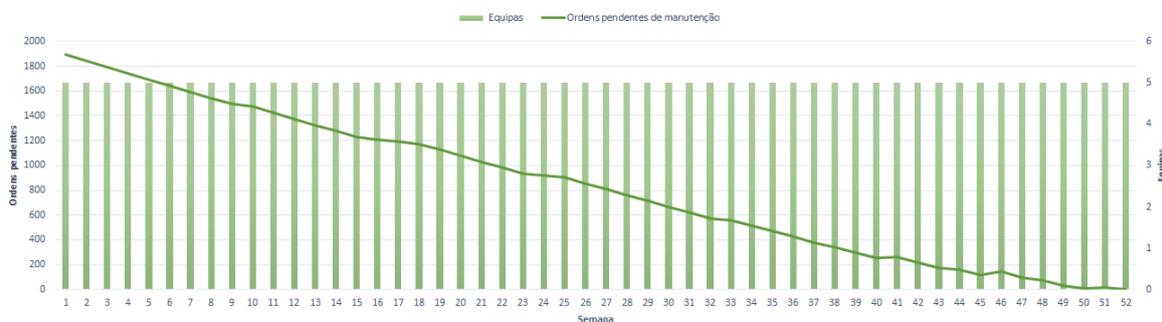


Fig. B.4 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 4.

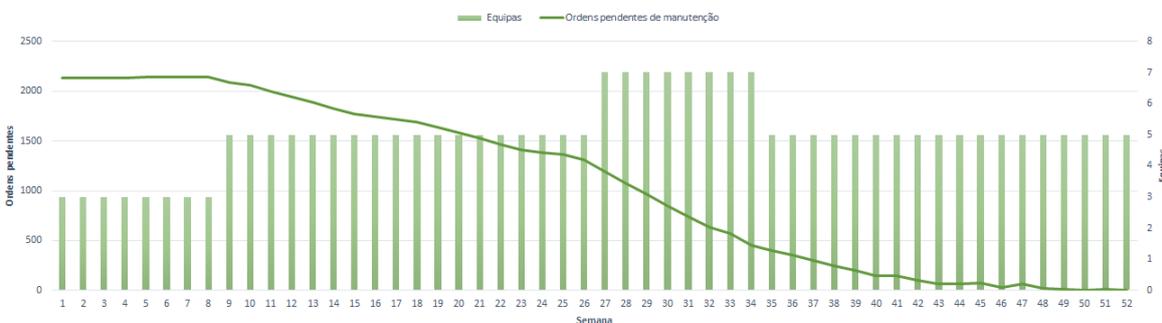


Fig. B.5 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 5.



Fig. B.6 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 6.



Fig. B.7 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 7.



Fig. B.8 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 8.

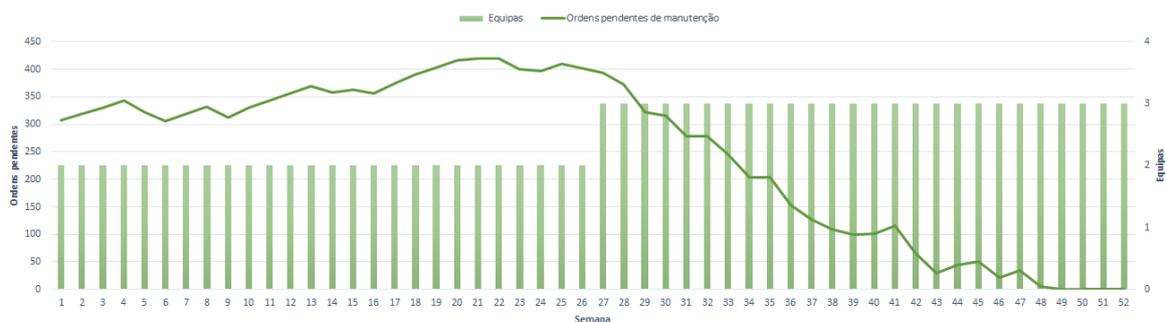


Fig. B.9 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 9.

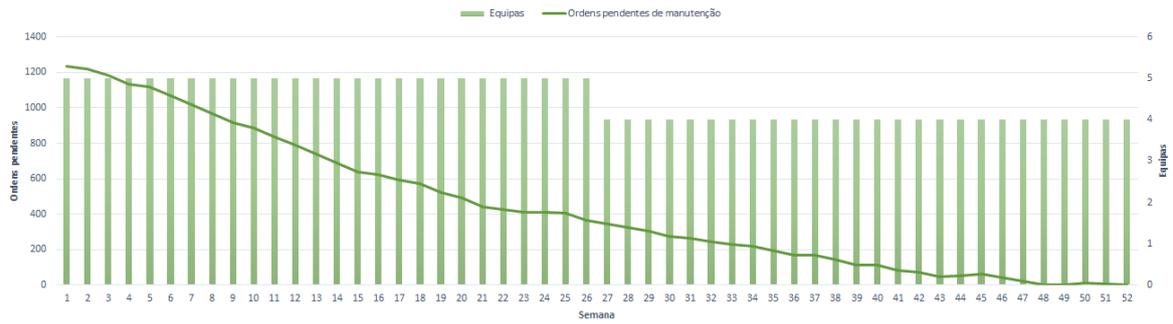


Fig. B.10 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 10.

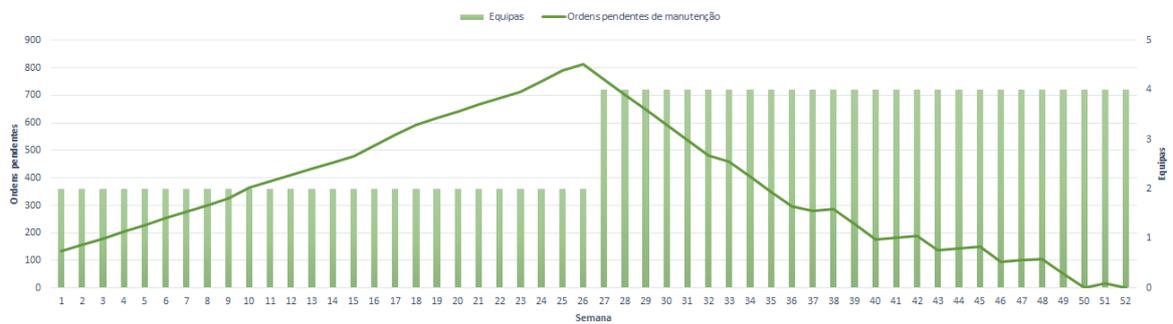


Fig. B.11 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 11.

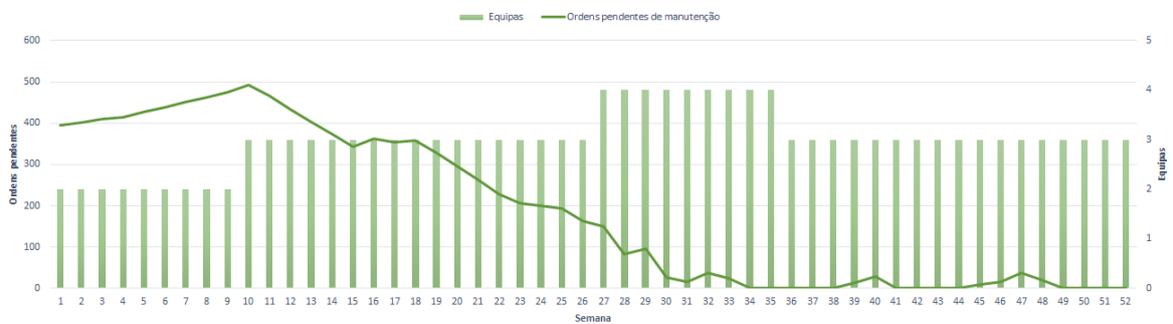


Fig. B.12 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M1.3 na empresa 12.

Anexo C

Gráficos - Relação do número de ordens pendentes de manutenção com o número de equipas em cada empresa na solução do modelo M2 com $k = 1$

Apresenta-se de seguida os gráficos relativos a cada empresa através do modelo M2 para o valor de $k = 1$. Assim, observa-se o número de ordens pendentes de manutenção e o número de equipas ao longo do período de estudo.

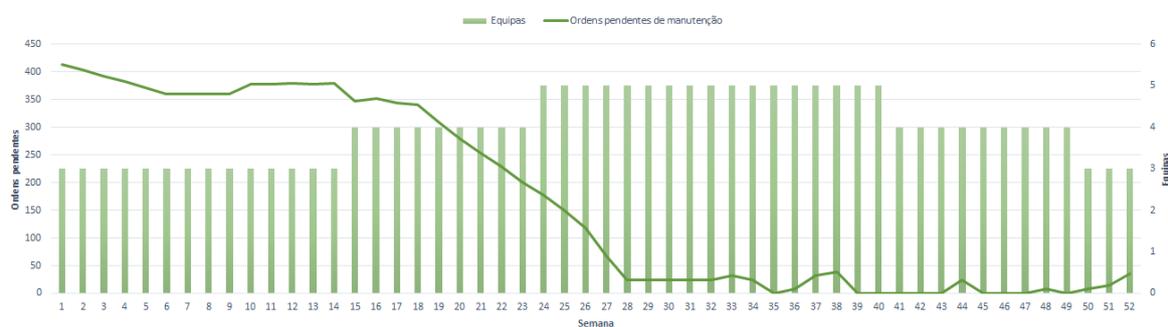


Fig. C.1 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 1.



Fig. C.2 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 2.



Fig. C.3 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 3.



Fig. C.4 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 4.



Fig. C.5 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 5.



Fig. C.6 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 6.



Fig. C.7 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 7.



Fig. C.8 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 8.



Fig. C.9 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 9.



Fig. C.10 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 10.

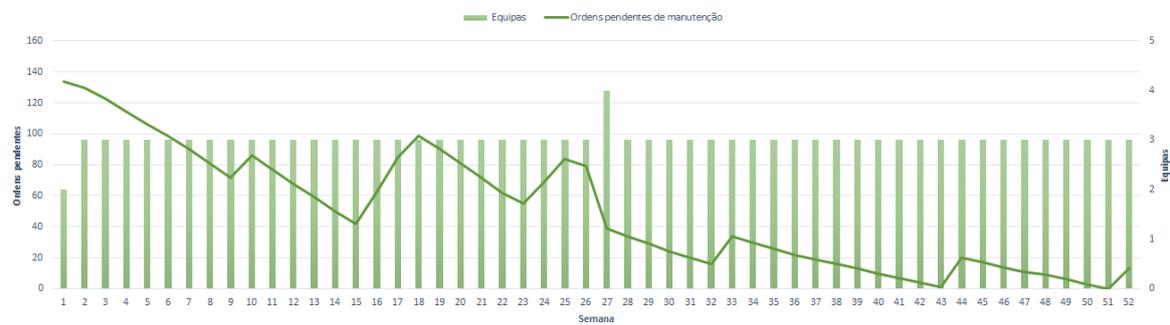


Fig. C.11 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 11.

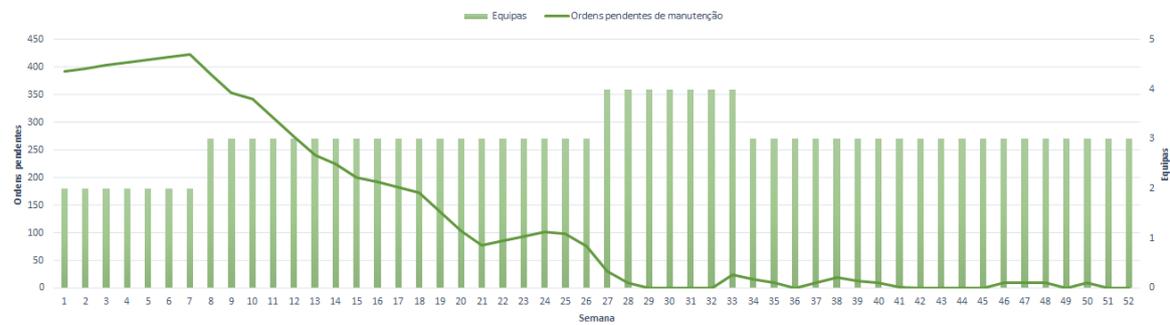


Fig. C.12 Análise do comportamento das ordens pendentes de manutenção e das equipas ao longo do período de estudo na solução do modelo M2 na empresa 12.