

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA E INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL



Ciências
ULisboa

Heurísticas para a marcação de Cirurgias Eletivas num Hospital Público

Mestrado em Estatística e Investigação Operacional
Especialização em Investigação Operacional

Catarina Custódio Mateus

Dissertação orientada por:
Professora Doutora Inês Marques Proença
Professora Doutora Maria Eugénia Vasconcelos Captivo

2016

Em primeiro lugar, quero agradecer às minhas orientadoras, a Professora Doutora Inês Marques Proença e a Professora Doutora Maria Eugénia Vasconcelos Captivo, pela oportunidade e disponibilidade. Agradeço ainda por toda a confiança, incentivo e pelo apoio demonstrado, fundamental para a realização desta dissertação.

Em segundo lugar, um agradecimento especial à minha família, principalmente aos meus pais, pelo apoio ao longo destes anos, nos momentos bons e menos bons, sempre com o mesmo entusiasmo e confiança no meu percurso académico.

Em terceiro lugar, quero agradecer às minhas colegas, Ana Wemans e Raquel Teixeira, pela partilha de ideias e, principalmente, pelas palavras amigas e encorajadoras, ao longo desta jornada.

Por fim, devo um agradecimento muito especial ao meu namorado, João Silva. Agradeço-lhe por todo o apoio e motivação ao longo do mestrado e, principalmente, no decorrer desta dissertação. Agradeço-lhe ainda pela enorme paciência e incentivo, sem ele seria muito mais difícil.

Resumo

Este trabalho enquadra-se no âmbito de um projeto em curso com um hospital público, onde foi estudado o problema de marcação de cirurgias eletivas.

A administração do hospital pretende atingir os objetivos e as metas definidas pelo Ministério da Saúde para a produção cirúrgica, de forma a assegurar um elevado nível de eficiência do serviço cirúrgico. Contudo, os hospitais não têm qualquer sistema de marcação de cirurgias eletivas e, por isso, o agendamento é realizado, muitas vezes, pelos cirurgiões, enfermeiros ou funcionários administrativos. Devido à grande quantidade de pacientes que um cirurgião pode ter em lista de espera, este pode lembrar-se mais facilmente de pacientes que consultou mais recentemente. Portanto, muitas vezes, as cirurgias são marcadas de forma pouco sistemática e não respeitando critérios de equidade, desrespeitando, assim, as metas do Ministério.

Foram consideradas três versões para o problema e foram desenvolvidas heurísticas com o objetivo de encontrar rapidamente boas soluções para cada versão do problema. As heurísticas selecionam os pacientes a serem agendados em cada semana e definem uma sala, um dia e um turno para a realização da respetiva cirurgia, de acordo com uma das três perspetivas diferentes do problema.

As heurísticas desenvolvidas foram testadas em quatro instâncias reais e os valores das soluções obtidas foram comparados com os valores das soluções obtidas através de modelos matemáticos, formulados em programação linear inteira mista. Através da comparação destes valores foi concluído que, para todas as versões e para todas as instâncias testadas, as soluções obtidas pelas heurísticas são de muito boa qualidade e o tempo computacional necessário para a sua execução é, em geral, bastante reduzido, mesmo considerando as instâncias com mais cirurgias em lista de espera.

Para além do desenvolvimento e implementação das heurísticas, foi criada uma interface de fácil utilização para o hospital, que possibilita a leitura da lista de espera e propõe uma agenda cirúrgica semanal. As heurísticas executadas através da interface são um bom meio para obter um sistema de marcação de cirurgias eletivas, tornando o processo de marcação mais automatizado e sistemático.

Palavras-Chave: Gestão de serviços de saúde, Marcação de cirurgias eletivas, Heurísticas, Pesquisa local, Interface

Abstract

This work is part of an ongoing project with a public hospital, where the problem of scheduling elective surgeries is studied.

The administration of the hospital aims to achieve the objectives and targets set by the Ministry of Health for surgical production, to ensure a surgical service with a high level of efficiency. However, hospitals do not have any elective surgeries scheduling system, so scheduling is often performed by surgeons, nurses or administrative staff. Due to the large number of patients that a surgeon may have on the waiting list, surgeons can remember more easily those patients consulted more recently. Often the surgeries are unsystematically scheduled and without respecting equity criteria, thus disregarding the Ministry's goals.

We consider three versions of the problem and heuristics have been developed in order to quickly find good solutions for each version of the problem. The heuristics select patients to be scheduled in each week and define a room, a day and a shift for the respective surgery in accordance with one of three different perspectives of the problem.

The heuristics developed were tested in four real instances and the values of the solutions were compared with the values of the solutions obtained using mathematical models formulated in mixed integer linear programming. By comparing these values, we concluded that, for all versions and for all instances tested, the solutions obtained by the heuristics are of very good quality and the computational time required for its implementation is generally quite low, even considering the instances with more surgeries on the waiting list.

In addition to the development and implementation of heuristics, a user-friendly interface for the hospital was created, which allows reading the waiting list and proposes a weekly surgical schedule. Executing heuristics through the interface is a good way to get an elective surgery scheduling system, making it a more automated and systematic scheduling process.

Keyword: Health services management, Elective surgeries scheduling, Heuristics, Local search, Interface

Índice

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Algoritmos	xiii
1 Introdução	1
2 Revisão de Literatura	3
2.1. Nível estratégico	3
2.2. Nível tático.....	4
2.3. Nível operacional	5
2.3.1. <i>Advanced scheduling</i>	6
2.3.2. <i>Allocation scheduling</i>	6
2.4. Integração de níveis de decisão.....	7
2.5. Conclusões	8
3 O Problema em Estudo	9
3.1. Descrição do problema.....	9
3.2. Base de dados.....	10
3.3. Instâncias.....	13
3.4. Modelos matemáticos	15
3.4.1. Versão Administração	17
3.4.2. Versão Cirurgiões.....	18
3.4.3. Versão Mista	20
3.5. Observações	20
4 Heurísticas Desenvolvidas	25
4.1. Metodologia de resolução	25
4.2. Heurísticas construtivas	25
4.3. Heurísticas de melhoramento.....	27
4.3.1. Reposicionar/trocar cirurgias entre salas e/ou turnos e/ou dias.....	29

4.3.2. Acrescentar cirurgias.....	33
4.3.3. Trocar cirurgias marcadas por cirurgias em lista de espera.....	34
4.3.4. Reposicionar cirurgias.....	39
4.4. Resultados Computacionais.....	42
4.4.1. Versão Administração.....	42
4.4.2. Versão Cirurgiões.....	47
4.4.2.1. Turnos da manhã.....	47
4.4.2.2. Turnos da tarde.....	49
4.4.3. Versão Mista.....	52
4.4.3.1. Turnos da manhã.....	52
4.4.3.2. Turnos da tarde.....	54
4.5. Conclusões.....	56
5 Análise dos Resultados	59
5.1. Indicadores de produtividade.....	59
5.2. Comparação com o registo do hospital em estudo.....	62
5.3. Simulação com durações reais.....	64
5.4. Conclusões.....	67
6 Interface	69
6.1. Leitura dos dados.....	69
6.2. Execução das heurísticas desenvolvidas.....	72
6.3. Visualização dos resultados.....	73
7 Conclusões e Trabalho Futuro	75
7.1. Conclusões.....	75
7.2. Trabalho futuro.....	76
Referências	77

Lista de Figuras

Figura 3.1. Evolução da lista de espera para as quatro especialidades com mais cirurgias por agendar	11
Figura 3.2. Exemplo, para um determinado procedimento, do tempo da intervenção cirúrgica e do tempo total do paciente na sala, para 30 cirurgias realizadas	13
Figura 3.3. MSS de Novembro de 2013 a Janeiro de 2014	14
Figura 3.4. MSS de Janeiro de 2015	14
Figura 3.5. MSS de Março de 2015.....	14
Figura 3.6. Penalidade em função do número de dias até à data limite.....	16
Figura 4.1. Exemplo de reposicionamento de uma cirurgia entre salas, no mesmo turno e no mesmo dia.....	29
Figura 4.2. Exemplo de uma troca entre duas cirurgias de blocos diferentes, no mesmo turno e no mesmo dia	30
Figura 4.3. Exemplo de uma troca de uma cirurgia marcada por uma cirurgia em lista de espera, para a VA.....	36
Figura 4.4. Exemplo de uma troca de uma cirurgia marcada por duas cirurgias em lista de espera, para a VA	37
Figura 4.5. Exemplo de uma troca de duas cirurgias marcadas por uma cirurgia em lista de espera, para a VA	37
Figura 4.6. Exemplo de uma troca de duas cirurgias marcadas por duas cirurgias em lista de espera, para a VA	39
Figura 4.7. Exemplo de uma troca entre uma cirurgia marcada, no início da semana, e duas cirurgias marcadas, no final da semana, para a VA	41
Figura 4.8. Resumo da eficiência das vizinhanças desenvolvidas para a VA	47
Figura 4.9. Resumo da eficiência das vizinhanças para a HC2+HM para a VC-TM.....	48
Figura 4.10. Resumo da eficiência das vizinhanças para a HC2+HM para a VC-TT	50
Figura 5.1. Número de cirurgias marcadas pelas heurísticas e número de cirurgias realizadas pelo hospital para as quatro semanas consideradas.....	62
Figura 5.2. Percentagem de cirurgias em comum com cirurgias realizadas pelo hospital para as 11 especialidades cirúrgicas para a instância S2_06.01.14	63
Figura 5.3. Número de cirurgias marcadas pela agenda cirúrgica semanal anterior (preto), número de cirurgias marcadas pela nova agenda cirúrgica semanal (cinzento) e número de cirurgias realizadas no hospital	66
Figura 5.4. Número de blocos com tempo de ocupação em excesso para a nova agenda cirúrgica semanal (cinzento) e para a antiga (preto).....	67
Figura 6.1. <i>Layout</i> da interface desenvolvida.....	69
Figura 6.2. Caixa de diálogo para abrir um ficheiro de dados.....	70

Figura 6.3. Exemplo de um ficheiro de dados em formato Excel	70
Figura 6.4. <i>Layout</i> da interface desenvolvida após leitura do ficheiro de dados.....	71
Figura 6.5. Editar parâmetros do problema	71
Figura 6.6. Caixa de diálogo para alterar duração de cirurgias	71
Figura 6.7. Caixa de diálogo para alterar tempos de limpeza.....	72
Figura 6.8. <i>Layout</i> da interface desenvolvida após seleccionados todos os parâmetros do problema	72
Figura 6.9. <i>Layout</i> da interface desenvolvida após execução das heurísticas	73
Figura 6.10. Exemplo de uma caixa de diálogo com uma mensagem de erro	73
Figura 6.11. <i>Layout</i> da interface desenvolvida ao ver as cirurgias marcadas para um dia da semana, turno e sala	73
Figura 6.12. Extrair solução para um ficheiro Excel.....	74
Figura 6.13. Eliminar dados, parâmetros e resultados.....	74

Lista de Tabelas

Tabela 3.1. Evolução da lista de espera.....	10
Tabela 3.2. Evolução da lista de espera de acordo com a prioridade	11
Tabela 3.3. Evolução da percentagem de cirurgias fora de prazo	12
Tabela 3.4. Evolução do número médio de dias fora de prazo de uma cirurgia em lista de espera	12
Tabela 3.5. Informações referentes às instâncias utilizadas	13
Tabela 3.6. Conjuntos e índices dos Modelos Matemáticos.....	15
Tabela 3.7. Subconjuntos dos Modelos Matemáticos	15
Tabela 3.8. Parâmetros dos Modelos Matemáticos	15
Tabela 3.9. Número de variáveis e restrições para a Versão Administração (todas as cirurgias)	21
Tabela 3.10. Número de variáveis e restrições para a Versão Cirurgiões e para a Versão Mista – Turnos da Manhã (todas as cirurgias)	21
Tabela 3.11. Número médio de variáveis e restrições para a Versão Administração considerando o Algoritmo 3.1	22
Tabela 3.12. Número médio de variáveis e restrições para a Versão Cirurgiões e para a Versão Mista – Turnos da Manhã considerando o Algoritmo 3.1	23
Tabela 4.1. Coeficiente considerado para a cirurgia c na heurística i para a versão k : $P_c^{i,k}$	26
Tabela 4.2. Resumo das vizinhanças propostas.....	42
Tabela 4.3. Comparação entre as duas heurísticas construtivas para a VA.....	43
Tabela 4.4. Resultados para a VA (S1_04.11.13)	43
Tabela 4.5. Resultados para a VA (S2_06.01.14)	44
Tabela 4.6. Resultados para a VA (S3_05.01.15)	44
Tabela 4.7. Resultados para a VA (S4_02.03.15)	44
Tabela 4.8. Tempo computacional, em segundos, para a VA (S1_04.11.13)	45
Tabela 4.9. Tempo computacional, em segundos, para a VA (S2_06.01.14)	45
Tabela 4.10. Tempo computacional, em segundos, para a VA (S3_05.01.15)	46
Tabela 4.11. Tempo computacional, em segundos, para a VA (S4_02.03.15)	46
Tabela 4.12. Resultados para a VC-TM (S1_04.11.13)	48
Tabela 4.13. Resultados para a VC-TM (S2_06.01.14)	48
Tabela 4.14. Resultados para a VC-TM (S3_05.01.15)	49
Tabela 4.15. Resultados para a VC-TM (S4_02.03.15)	49
Tabela 4.16. Resultados para a VC-TT (S1_04.11.13)	50
Tabela 4.17. Resultados para a VC-TT (S2_06.01.14)	50
Tabela 4.18. Resultados para a VC-TT (S3_05.01.15)	50
Tabela 4.19. Resultados para a VC-TT (S4_02.03.15)	50
Tabela 4.20. Tempo computacional, em segundos, para a VC (S1_04.11.13).....	51
Tabela 4.21. Tempo computacional, em segundos, para a VC (S2_06.01.14).....	51
Tabela 4.22. Tempo computacional, em segundos, para a VC (S3_05.01.15).....	51
Tabela 4.23. Tempo computacional, em segundos, para a VC (S4_02.03.15).....	51

Tabela 4.24. Resultados para a VM-TM (S1_04.11.13)	52
Tabela 4.25. Resultados para a VM-TM (S2_06.01.14)	53
Tabela 4.26. Resultados para a VM-TM (S3_05.01.15)	53
Tabela 4.27. Resultados para a VM-TM (S4_02.03.15)	53
Tabela 4.28. Resultados para a VM-TT (S1_04.11.13)	54
Tabela 4.29. Resultados para a VM-TT (S2_06.01.14)	54
Tabela 4.30. Resultados para a VM-TT (S3_05.01.15)	55
Tabela 4.31. Resultados para a VM-TT (S4_02.03.15)	55
Tabela 4.32. Tempo computacional, em segundos, para a VM (S1_04.11.13).....	55
Tabela 4.33. Tempo computacional, em segundos, para a VM (S2_06.01.14).....	55
Tabela 4.34. Tempo computacional, em segundos, para a VM (S3_05.01.15).....	56
Tabela 4.35. Tempo computacional, em segundos, para a VM (S4_02.03.15).....	56
Tabela 4.36. Resumo das heurísticas utilizadas em cada versão.....	56
Tabela 4.37. Resumo dos resultados para a VA.....	56
Tabela 4.38. Resumo dos resultados para a VC	57
Tabela 4.39. Resumo dos resultados para a VM	57
Tabela 5.1. Performance do bloco operatório referente à sua ocupação	59
Tabela 5.2. Informação referente às cirurgias marcadas	60
Tabela 5.3. Informação referente às cirurgias não marcadas	60
Tabela 5.4. Informação referente aos cirurgões	61
Tabela 5.5. Comparação do número de cirurgias realizadas pelo hospital com o número de cirurgias agendadas pelas heurísticas	62
Tabela 5.6. Informação referente às cirurgias em comum entre as cirurgias marcadas pelas heurísticas e as cirurgias realizadas pelo hospital	63
Tabela 5.7. Cirurgias agendadas que se encontram no registo do hospital em estudo	64
Tabela 5.8. Alterações nos tempos das cirurgias e nos tempos totais dos pacientes na sala do bloco operatório	64
Tabela 5.9. Informação referente aos blocos de tempos utilizando as durações reais presentes nos registos	65
Tabela 5.10. Performance do bloco operatório referente à sua ocupação considerando a duração real das cirurgias, presente no registo do hospital.....	67

Lista de Algoritmos

Algoritmo 3.1. Pseudo-código do algoritmo para obter a solução ótima do problema	22
Algoritmo 4.1. Pseudo-código da HCl para a versão k	28
Algoritmo 4.2. Pseudo-código da \mathcal{V}^1	30
Algoritmo 4.3. Pseudo-código da \mathcal{V}^2	31
Algoritmo 4.4. Pseudo-código da \mathcal{V}^3	32
Algoritmo 4.5. Pseudo-código da \mathcal{V}^4	33
Algoritmo 4.6. Pseudo-código da \mathcal{V}^5	34
Algoritmo 4.7. Pseudo-código da \mathcal{V}^6	35
Algoritmo 4.8. Pseudo-código da \mathcal{V}^7	36
Algoritmo 4.9. Pseudo-código da \mathcal{V}^8	38
Algoritmo 4.10. Pseudo-código da \mathcal{V}^9	39
Algoritmo 4.11. Pseudo-código da \mathcal{V}^{10}	40
Algoritmo 4.12. Pseudo-código da \mathcal{V}^{11}	41

Capítulo 1

Introdução

Em Portugal, o Serviço Nacional de Saúde (SNS) foi criado em 1979 de modo a assegurar o direito à proteção da saúde a todos os cidadãos, independentemente da sua condição económica e social. São parte integrante do SNS todas as instituições e serviços oficiais prestadores de cuidados de saúde dependentes do Ministério da Saúde: agrupamentos de centros de saúde, estabelecimentos hospitalares e unidades locais de saúde.

Um dos desafios impostos ao Ministério da Saúde é a melhoria da gestão do SNS de forma a proporcionar uma melhor qualidade na saúde para os utentes, com melhores condições de trabalho para os recursos humanos existentes.

É conhecido que, em determinados hospitais públicos, o tempo de espera no atendimento, em diversos serviços, é muito superior ao recomendável; como é o caso das consultas, exames, cirurgias, entre outros. Para alterar esta situação, o Ministério da Saúde pretende alcançar algumas medidas sociais que limitam o número de pacientes em lista de espera, o número de dias que um paciente está em lista de espera e a percentagem de pacientes que são tratados depois do período aceitável de resposta. Quando um hospital não cumpre as metas estabelecidas do Ministério, sofre penalidades orçamentais.

Este trabalho enquadra-se no âmbito de um projeto em curso com um hospital público, onde o foco é o estudo do plano cirúrgico, no que respeita à seleção dos pacientes a serem agendados em cada semana, para a realização da respetiva cirurgia.

Uma intervenção cirúrgica pode ser considerada urgente (o paciente apresenta um quadro grave que exige uma intervenção cirúrgica de imediato) ou eletiva (o paciente apresenta um quadro que exige uma intervenção cirúrgica, mas, uma vez que não é urgente, pode escolher-se a melhor data para realizar o procedimento). Como os casos urgentes não são programados e exigem uma intervenção imediata, não necessitam de ser agendados no planeamento cirúrgico nem são colocados em lista de espera e, por isso, não são considerados neste trabalho, recaindo assim este estudo apenas no planeamento das cirurgias eletivas.

A administração do hospital pretende atingir as metas impostas pelo Ministério da Saúde e deseja assegurar um elevado nível de eficiência do serviço cirúrgico. Este é um dos serviços mais dispendiosos num hospital, tem uma elevada procura e influência outros serviços relevantes no hospital (por exemplo, enfermarias).

Normalmente, os hospitais não têm qualquer sistema de marcação de cirurgias eletivas. O agendamento, muitas vezes, é realizado pelos cirurgiões, enfermeiros ou por funcionários administrativos. Assim, devido à grande quantidade de pacientes que um cirurgião pode ter em lista de espera, é natural que se lembre mais facilmente de pacientes que consultou mais recentemente. Portanto, muitas vezes as cirurgias são marcadas não respeitando critérios de equidade, desrespeitando as metas do Ministério, e de forma pouco sistemática.

A Investigação Operacional é uma ferramenta útil para encontrar boas soluções para problemas com aplicação real, como é o caso da marcação de cirurgias eletivas. Isto é feito através da elaboração de modelos matemáticos que representem a realidade e da sua posterior resolução.

Ao utilizar modelos matemáticos para representar a realidade, tem-se a vantagem de poder obter a solução ótima do problema. Mas pode ter-se a desvantagem do modelo ser demasiado difícil para ser resolvido em tempo útil e/ou do *software* que permite resolver o modelo matemático ser muito dispendioso e de difícil acesso por parte de pessoas sem formação na área. Assim, as heurísticas são uma boa alternativa, podendo ser utilizadas para encontrar soluções de boa qualidade para um problema, em tempo útil, e com a possibilidade de serem desenvolvidas de forma a serem utilizadas em qualquer computador e por parte de pessoas que não necessitam de ter formação na área.

O objetivo desta dissertação é desenvolver e implementar heurísticas para auxiliar os decisores na marcação de cirurgias eletivas no hospital público em estudo tendo em conta os objetivos e as metas definidas pelo Ministério da Saúde para a produção cirúrgica. Uma vez que as heurísticas são para ser utilizadas no hospital, foi criada uma interface de fácil utilização, que permite a leitura da lista de espera e propõe uma agenda cirúrgica semanal.

Para além da introdução, esta dissertação contém ainda 6 capítulos.

No capítulo 2, são abordados alguns problemas existentes na literatura, cujo foco é a marcação de cirurgias eletivas.

No capítulo 3, é apresentado o problema e os modelos em programação linear inteira mista, nos quais se baseia este trabalho.

No capítulo 4, são descritas as heurísticas desenvolvidas para o problema exposto no capítulo anterior, e são apresentados os resultados referentes à qualidade das heurísticas, em comparação com os modelos exatos.

No capítulo 5, é feita uma análise dos resultados no que diz respeito à sua aplicação na situação real, isto é, no hospital em estudo.

No capítulo 6, faz-se uma breve descrição do funcionamento da interface criada.

Por fim, no último capítulo são apresentadas as conclusões retiradas do trabalho elaborado.

Capítulo 2

Revisão de Literatura

A aplicação da Investigação Operacional aos cuidados de saúde tem sido fortemente desenvolvida nas últimas décadas. São exemplos de problemas estudados nesta área: decidir os melhores locais para instalar unidades de saúde; determinar quantas ambulâncias são necessárias e em que locais devem ser instaladas; calcular quantas enfermeiras é necessário contratar e a que enfermarias devem ficar alocadas; assim como marcar cirurgias eletivas. Existem diversas metodologias na literatura para obter soluções para estes problemas.

As mais recentes revisões de literatura sobre a aplicação da investigação operacional ao planeamento e agendamento de cirurgias, foram realizadas por Cardoen et al. [1] em 2010, Guerriero e Guido [2] em 2011 e Van Riet e Demeulemeester [3] em 2015. Nestes artigos, é possível observar a diversidade de problemas que já foram estudados, as suas características principais, e as técnicas utilizadas para os resolver.

Nos problemas de marcação de cirurgias, assim como em geral nos problemas logísticos, existem três níveis de decisão a ser tomadas: nível estratégico, nível tático e nível operacional. No nível estratégico, as decisões têm efeito a longo prazo e incluem usualmente o desenho dos sistemas logísticos e aquisição de recursos (por exemplo, a definição do número de salas existentes no bloco operatório). No nível tático, as decisões têm efeito a médio prazo e incluem o planeamento de produção, bem como a afetação de recursos (por exemplo, a definição de qual a especialidade clínica que será afeta a cada sala do bloco operatório, nos meses seguintes). Por fim, no nível operacional, as decisões têm efeito no dia-a-dia ou em tempo real, e incluem o escalonamento de pessoas ou tarefas (por exemplo, a definição dos pacientes a operar na semana seguinte).

Estes três níveis de decisão dependem uns dos outros. Logo, para tomar uma decisão a nível tático, tem de conhecer-se a decisão tomada a nível estratégico; e para ser tomada uma decisão a nível operacional, têm de conhecer-se as decisões tomadas a nível estratégico e tático.

Assim, este capítulo divide-se em 5 secções. As 3 primeiras correspondem à apresentação de alguns artigos encontrados na literatura, que tratam cada nível de decisão. Na quarta secção, são apresentados alguns artigos que englobam o estudo de mais do que um nível de decisão. Por fim, na última secção, são apresentadas algumas conclusões.

2.1. Nível estratégico

No nível estratégico o principal objetivo é distribuir o tempo disponível nas salas de operação pelos diferentes cirurgiões e/ou pelos grupos de cirurgia. Assim, é principalmente um problema de afetação de recursos. Para obter soluções para este problema, utiliza-se, usualmente, o histórico dos dados e

métodos preditivos, e o horizonte de planeamento costuma ser maior ou igual a um ano. Usualmente, na literatura, estes problemas denominam-se por *Case Mix Planning Problem*.

Nestes problemas, genericamente, os objetivos podem ser: maximizar o número de pacientes tratados, maximizar o desempenho, minimizar custos, entre outros. Os problemas são usualmente condicionados pelos recursos disponíveis, e pela capacidade temporal das salas de operação. Habitualmente, estes problemas são representados por modelos em programação linear, programação linear inteira ou programação linear inteira mista.

Em 1969, foi publicado um dos primeiros artigos em que os autores desenvolvem um modelo de otimização linear para o planeamento hospitalar que maximiza o número de cirurgias marcadas. Neste trabalho, Baligh e Laughhunn [4] dividem os pacientes em classes de equivalência e cada classe de equivalência tem a sua ponderação na função objetivo que representa o valor (lucro) que o paciente tem para o hospital. O objetivo é maximizar a função objetivo tendo em conta restrições orçamentais e restrições sobre os recursos físicos que se encontram à disposição do hospital. A solução ótima do modelo proposto define a capacidade da produção hospitalar.

Hughes e Soliman [5], em 1985, realizam um trabalho em programação linear, que maximiza o retorno financeiro. Neste artigo, os pacientes encontram-se divididos em grupos, conforme o seu diagnóstico hospitalar, e o objetivo é decidir o número anual de pacientes a tratar, de cada grupo, considerando restrições de capacidade (camas, blocos operatórios, equipamentos, entre outros).

Blake e Carter [6], em 2002, desenvolvem uma metodologia de resolução de um problema, onde se pretende determinar o tempo associado a cada cirurgião, na sala de operações, consoante o grupo de cirurgia, o número de cirurgias afetas a cada cirurgião e o custo de associar um cirurgião a um determinado grupo de cirurgia. A metodologia de resolução criada utiliza dois modelos em programação linear por metas.

Ma et al. [7], em 2009, descrevem uma metodologia para um problema onde se pretende determinar quantos pacientes de cada grupo (os pacientes são considerados do mesmo grupo, se utilizam os mesmos recursos e apresentam os mesmos parâmetros a nível clínico) serão submetidos a cirurgia, e como serão os recursos associados às diversas especialidades clínicas. O objetivo é maximizar os lucros do hospital considerando uma determinada capacidade dos recursos disponíveis (cirurgiões, salas de operação e camas). Os autores desenvolvem um algoritmo *branch-and-price* e comparam os resultados com os obtidos através da utilização de um *solver*.

2.2. Nível tático

Depois do nível estratégico estar definido passa-se para o nível tático onde o principal objetivo é desenvolver um *Master Surgical Schedule* (MSS). Um MSS é um plano semanal que define o número e o tipo de salas de operação disponíveis, as horas em que cada sala de operação funciona e que cirurgiões ou grupos de cirurgia têm prioridade na utilização do tempo das salas de operação. Usualmente, o MSS pode ser alterado durante o ano, sendo por isso o horizonte de planeamento inferior ao do nível estratégico, e a sua construção é designada na literatura por *Master Surgery Planning*.

Em 2002, Blake et al. [8] desenvolvem um modelo em programação linear inteira, com o objetivo de afetar os blocos de tempo das salas de operação aos diferentes grupos cirúrgicos, no horizonte de planeamento de uma semana. Neste trabalho, já está determinado, à partida, a distribuição do tempo das salas de operação pelos diferentes grupos de cirurgia (nível estratégico) e é minimizada a soma ponderada da diferença entre o tempo real atribuído e o valor que se pretendia obter. As restrições do

modelo envolvem a capacidade das salas de operação ao nível de tempo disponível e limites inferiores e superiores para o número de blocos de tempo de cada tipo de sala afetos a cada grupo cirúrgico.

Vissers et al. [9], em 2005, apresentam um modelo em programação linear mista para planejar, para cada dia da semana, o número de horas que uma sala de operações funciona, e o número de pacientes de cada categoria que são operados. Os pacientes são agregados em categorias, consoante a necessidade de recursos exigidos na cirurgia. O modelo pretende minimizar a soma ponderada, entre a utilização em excesso e em escassez, dos recursos disponíveis (tempo disponível em cada sala de operações, número de camas e número de enfermeiros).

Van Oostrum et al. [10], em 2008, desenvolvem um modelo em programação linear inteira estocástica que lida com o problema da incerteza na duração dos procedimentos cirúrgicos. O modelo determina uma lista de tipos de procedimentos cirúrgicos, que serão realizados em cada sala de operações, em cada dia do horizonte de planeamento, com o objetivo de maximizar a utilização das salas de operação, tendo em conta a necessidade de camas nas unidades de pós-operatório. Como os dois critérios são contraditórios, é utilizada uma soma ponderada. Para resolver o modelo, os autores dividem o problema em duas fases, na primeira é utilizada uma aproximação heurística com base no método de geração de colunas, e a solução obtida na fase 1 é utilizada para resolver o modelo exato na fase 2.

Beliën et al. [11], em 2009, desenvolvem um sistema de apoio à decisão que permite construir o MSS. O sistema baseia-se em técnicas de programação inteira mista, envolvendo a solução de um problema multi-objetivo resolvido através de programação linear, programação quadrática e através de uma meta-heurística baseada no procedimento de *simulated annealing*. Através das diferentes técnicas, são obtidas soluções diferentes, e é da responsabilidade do agente de decisão decidir qual o plano que deve ser escolhido.

2.3. Nível operacional

O terceiro e último nível de decisão diz respeito ao planeamento dos pacientes eletivos a operar para os dias delineados no MSS. Esta fase é designada por *Elective Case Scheduling* e pode ser dividida em dois problemas: *advanced scheduling* e *allocation scheduling*. A diferença é que, enquanto no problema *advanced scheduling* os pacientes são afetos a dias e/ou a salas de operação, no problema de *allocation scheduling* os pacientes são sequenciados em cada dia ou são afetos a um determinado horário.

Na literatura, existem diversos artigos que englobam os dois problemas, como é o exemplo do problema abordado em Fei et al. [12], onde os problemas ocorrem sequencialmente, e em Roland et al. [13] em que os problemas estão integrados.

Fei et al. [12], em 2006, formulam o problema de afetação das cirurgias em lista de espera aos blocos de tempo de cada cirurgião, através de um modelo em programação inteira binária e formulam o problema de determinar a ordem pela qual as cirurgias irão ocorrer ao longo do dia, através de um modelo de *Flow Shop*. O horizonte de planeamento considerado foi uma semana e, para resolverem a primeira fase, são utilizados procedimentos heurísticos baseados na técnica de geração de colunas e, na fase seguinte, com a solução obtida na primeira fase, é utilizado um algoritmo genético híbrido para obter uma solução para o problema.

Resolvendo os dois problemas sequencialmente pode levar a uma solução, não necessariamente ótima, e de maneira a tal não acontecer, pode ser útil integrar os dois problemas num único modelo matemático. Roland et al. [13], em 2010, formulam, em programação linear inteira mista, um

problema em que se pretende escolher, na lista de espera, quais as cirurgias a serem realizadas e, para as cirurgias marcadas, saber em que dia, sala e período de tempo devem ser realizadas de forma a minimizar os custos de utilização das salas de operação e os custos associados ao pagamento de horas extraordinárias. Para resolver este problema, os autores propõem um procedimento baseado num algoritmo genético.

2.3.1. *Advanced scheduling*

Ogulata e Erol [14], em 2003, desenvolvem três modelos hierárquicos multicritério em programação linear inteira para obter um plano semanal dos pacientes a operar em cada sala de operações, de forma a maximizar a utilização das salas de operação, distribuir de forma equilibrada o tempo entre grupos de cirurgiões em termos de dias de operação, e minimizar os tempos de espera dos pacientes. No primeiro modelo, é feita a seleção dos pacientes a serem sujeitos a realização cirúrgica durante a semana. No segundo modelo, os pacientes são atribuídos aos grupos de cirurgiões e, por fim, no último modelo é determinado a que dia e a que sala os pacientes selecionados ficam afetos.

Hans et al. [15], em 2008, apresentam o problema de afetação de cirurgias às salas de operação de maneira robusta, isto é, considerando uma folga para cada sala de operação de modo a reduzir o risco de horas extraordinárias. Assim, é considerado, simultaneamente, a maximização da utilização das salas de operação e a minimização do risco das horas extraordinárias que leva ao cancelamento de pacientes. A determinação da folga para cada sala de operação é obtida através dos dados históricos e da duração prevista das cirurgias marcadas para a sala que está a ser considerada. Para obter uma solução para o problema, os autores utilizam heurísticas construtivas e uma meta-heurística baseada no procedimento de *simulated annealing*.

Addis et al. [16], em 2014, também apresentam uma abordagem robusta do problema de afetação dos pacientes às salas de operação; mas, neste caso, não é considerada uma folga para cada sala. É considerado que a duração de cada cirurgia tem um tempo estocástico. O problema baseia-se na afetação dos pacientes às salas, de forma a minimizar uma medida do tempo de espera dos doentes. Para tal, os autores criam uma função de penalidade que tem em conta o tempo em lista de espera para cirurgia, o grau de urgência da cirurgia e o atraso na sua realização.

Marques e Captivo [17], em 2016, apresentaram 3 versões para o problema *advanced scheduling* baseadas nas metas pretendidas pelo hospital em estudo para o planeamento cirúrgico. Nesse trabalho, são desenvolvidos vários modelos determinísticos em programação linear inteira mista onde é simulado o que a administração do hospital em estudo pretende (equidade na escolha dos pacientes a operar), o que os cirurgiões praticam (escolher os pacientes a operar de acordo com os seus próprios critérios), assim como uma versão mista criada pelos autores para conjugar as duas anteriores.

2.3.2. *Allocation scheduling*

Arnaout e Kulbashian [18], em 2008, abordam o problema *allocation scheduling* como um problema de programação de máquinas paralelas não idênticas, onde se pretende executar tarefas com tempos de preparação dependentes da sequência, cujo objetivo é minimizar a função custo. Neste problema, as máquinas paralelas são as salas de operação, as tarefas a realizar são as cirurgias, e o objetivo é maximizar a utilização do bloco operatório, minimizando para isso o tempo máximo em que se conclui a última operação. Para obter soluções para o problema, os autores utilizam heurísticas.

Cardoen et al. [19], em 2009, propõem um modelo em programação linear inteira mista para o problema *allocation scheduling*. Neste artigo, o modelo é multi-objetivo onde se pretende otimizar seis objetivos conflituosos. Para resolver o modelo, as seis funções objetivo são combinadas numa única, através de ponderações, e o modelo foi resolvido de forma exata. Também são desenvolvidas heurísticas, onde as soluções obtidas com instâncias de teste foram comparadas com as soluções obtidas pelo modelo de forma a avaliar a qualidade das heurísticas.

2.4. Integração de níveis de decisão

Ao abordar um problema com o objetivo de afetar pacientes às salas de operação, sem ter o MSS, pode ser útil pensar num problema em que se pretende resolver, simultaneamente, o nível tático e o nível operacional. Nestas circunstâncias, pode ser útil fazer a integração, no problema, de dois ou mesmo dos três níveis de decisão.

Testi et al. [20], em 2007, apresentam um problema onde os três níveis de decisão são considerados. Devido à complexidade do problema, os autores apenas consideram um departamento cirúrgico com várias especialidades. Os três níveis de decisão são resolvidos de forma hierárquica, fazendo com que a solução de uma fase seja uma restrição na fase seguinte. Na primeira fase, é definido o número de blocos a serem agendados durante todas as semanas; na segunda fase, é construído um MSS, onde é realizada uma afetação entre especialidades, salas de operação e dias; e, por fim, na última fase, são escolhidos os pacientes a serem submetidos a cirurgia, em cada sala.

Em 2012, Marques et al. [21], desenvolveram um modelo em programação linear inteira com o objetivo de utilizar os recursos instalados no bloco operatório de forma eficiente e melhorar o funcionamento dos serviços. Neste modelo, pretende-se maximizar a ocupação do bloco operatório, tendo em conta restrições de prioridade de pacientes, tempo máximo diário e semanal em que os cirurgiões podem realizar cirurgias, e capacidade das salas de operação. Este modelo faz uma afetação de especialidades clínicas a cada sala de operação e determina quais serão as cirurgias realizadas e em que dia da semana, e qual a hora prevista para o início. Pode ser considerado, simultaneamente, um problema de *Master Surgery Planning* e *Elective Case Scheduling*. Este problema foi resolvido de maneira exata e através de uma aproximação heurística.

No mesmo ano, Marques et al. [22], estudaram o mesmo problema, mas considerando também uma função objetivo em que se pretende maximizar o número de cirurgias realizadas. Para cada um dos objetivos, são desenvolvidas duas heurísticas construtivas e de melhoramento, de acordo com duas fases hierárquicas. Posteriormente, em Marques et al. [23] para o mesmo problema é elaborado um algoritmo genético que combina, simultaneamente, a resolução das duas fases separadas no artigo anterior, fazendo com que o problema fosse abordado de uma maneira integrada, melhorando assim os resultados obtidos.

Quando se considera duas funções objetivo, é mais adequado utilizar uma combinação de ambas e usar uma abordagem bi-critério. Em Marques et al. [24] e em Marques e Captivo [25] são realizadas duas abordagens bi-critério ao mesmo problema considerado anteriormente, onde são desenvolvidas heurísticas construtivas e de melhoramento, e um algoritmo evolutivo, respetivamente.

2.5. Conclusões

Com os exemplos descritos neste capítulo, é possível perceber que existe diversa literatura na área do planeamento de cirurgias. Mas é interessante notar que, dependendo de situação para situação, os parâmetros e as restrições do problema são diferentes assim como o que se pretende otimizar. Portanto, existe uma grande diversidade de problemas já estudados, que são baseados na situação de cada hospital. Logo, os modelos utilizados nestes problemas e os métodos para determinar soluções dependem bastante do caso real que esteja a ser tratado.

Ao abordar um problema de planeamento de cirurgias, para além da necessidade de formular o problema através de um modelo matemático, é sempre importante desenvolver heurísticas, uma vez que os modelos são, usualmente, considerados difíceis de resolver a nível computacional devido à sua complexidade.

Ao desenvolver boas heurísticas, podem obter-se boas soluções para o problema e, através destas, pode ser criado um sistema de apoio à decisão para que os algoritmos desenvolvidos sejam praticáveis.

Capítulo 3

O Problema em Estudo

No presente capítulo, é explicado o problema em estudo, a base de dados usada para a realização deste trabalho e as instâncias utilizadas. Seguidamente, são apresentados os modelos matemáticos anteriormente desenvolvidos para o problema, com a explicação dos seus parâmetros, restrições e variantes. Por fim, são feitas observações referentes aos modelos matemáticos, à sua complexidade computacional e às dificuldades surgidas na sua implementação prática.

3.1. Descrição do problema

O hospital em estudo é constituído por um bloco operatório, que contém 11 salas partilhadas por 11 especialidades ou serviços. Uma destas 11 salas é apenas dedicada a cirurgias urgentes e, uma vez que este estudo se baseia apenas em cirurgias eletivas, é omitida no presente trabalho.

As especialidades ou serviços existentes neste hospital são: Cirurgia 3B (C3b), Cirurgia 3C (C3c), Cirurgia Maxilo-Facial (CMF), Cirurgia Pediátrica (CPD), Cirurgia Plástica (CPL), Ginecologia (GIN), Oftalmologia (OFT), Ortopedia A (ORTa), Ortopedia B (ORTb), Otorrinolaringologia (OTO) e Urologia (URO).

O serviço cirúrgico do hospital está aberto todos os dias úteis da semana e encontra-se dividido em dois turnos: o turno da manhã (8h15m-15h) e o turno da tarde (15h-21h). A cada sala pertencente ao bloco operatório é atribuído, em cada dia da semana e em cada turno, uma das 11 especialidades, de acordo com um plano previamente realizado (MSS), para o horizonte de planeamento de uma semana. Assim, o MSS é fixo. Porém, pode ser ajustado consoante as necessidades, durante o ano.

Quando um paciente entra em lista de espera para uma cirurgia eletiva, é registada a especialidade a que pertence, o cirurgião que a vai realizar, o procedimento cirúrgico que irá ser realizado e o nível de prioridade da cirurgia.

De acordo com a legislação em vigor ([26] e [27]), o nível de prioridade define o tempo máximo que um paciente deve estar em lista de espera, e pode ser um de quatro níveis: o nível 4 é utilizado para as cirurgias urgentes diferidas (72 horas), o nível 3 para as cirurgias muito prioritárias (15 dias), o nível 2 para as cirurgias prioritárias (60 dias) e, por fim, o nível 1 para as restantes cirurgias (270 dias).

Para simplificar a escrita, vai chamar-se data limite de uma cirurgia à data em que termina o tempo clinicamente aceitável para ser realizada a intervenção cirúrgica. Para representar as cirurgias que ultrapassam a data limite em lista de espera, utiliza-se o termo fora de prazo.

Tendo em conta que as cirurgias urgentes diferidas necessitam de ser executadas em 72 horas, e considerando que o agendamento cirúrgico para a semana seguinte é realizado à sexta-feira, então estas cirurgias têm de ser agendadas para a segunda-feira seguinte de acordo com o tempo máximo de resposta definido pelo Ministério da Saúde.

Quando um paciente entra numa sala do bloco operatório, para ser realizada a sua cirurgia, existem duas fases: a anestesia e a intervenção cirúrgica. Inicialmente são realizados os cuidados anestésicos pré-intervenção, posteriormente o cirurgião entra na sala para realizar a cirurgia e, quando a intervenção termina, são realizados os cuidados anestésicos pós-intervenção. A presença do cirurgião só é necessária na fase que diz respeito à intervenção cirúrgica. No final dos cuidados anestésicos pós-intervenção, o paciente sai da sala do bloco operatório e a sala e os seus acessórios são lavados e desinfetados. Assim, é necessário garantir que quando são agendadas cirurgias para uma sala, num determinado dia e turno, não seja excedido o tempo disponível da sala para aquele turno, considerando a duração total da cirurgia (anestesia e intervenção) e a posterior limpeza.

Portanto, ao marcar uma cirurgia para uma determinada sala e para um determinado turno, tem de ser tido em conta se essa sala, nesse turno, está designada para a especialidade cirúrgica associada à cirurgia, se o cirurgião está disponível para realizar a cirurgia nesse intervalo de tempo e se a cirurgia é realizável no tempo disponível da sala.

No final de uma semana e ao fazer o agendamento cirúrgico para a semana seguinte, é necessário escolher os pacientes a serem agendados para cada sala, para cada turno e para cada dia, conjugando a sua prioridade e a sua antiguidade na lista de espera, de modo a obedecer a critérios de equidade no acesso.

O estudo deste problema já foi realizado em Marques e Captivo [17], onde foi concluído que as soluções obtidas pelo modelo matemático, que representa a escolha dos pacientes a operar conjugando a sua prioridade e a sua antiguidade na lista de espera, não corresponde, na maioria dos casos, aos pacientes selecionados pelo hospital, de acordo com os registos fornecidos. Assim, os autores elaboraram três versões para o problema:

- **Versão Administração (VA):** Selecionar os pacientes de acordo com a prioridade e a sua antiguidade na lista de espera.
- **Versão Cirurgiões (VC):** Selecionar os pacientes utilizando os critérios próprios dos cirurgiões que acabam por se transformar na seleção pela ordem inversa de entrada na lista de espera, considerando estratégias diferentes para os turnos da manhã e para os turnos da tarde.
- **Versão Mista (VM):** Nos turnos da manhã, selecionar os pacientes de acordo com a prioridade e a sua antiguidade na lista de espera (VA) e, nos turnos da tarde, selecionar os pacientes pela ordem inversa de entrada na lista de espera (VC).

3.2. Base de dados

Os dados utilizados para a realização deste trabalho datam de janeiro de 2013 até maio de 2015 e compreendem o registo de todas as cirurgias realizadas entre estas datas. Para além do registo de todas as cirurgias realizadas, os dados utilizados compreendem também listas de espera, que correspondem à lista dos pacientes a aguardar cirurgia, em determinadas datas.

Com os dados recolhidos, é possível observar que o hospital em estudo apresenta um aumento progressivo do número de pacientes em lista de espera para cirurgia, como observado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Evolução da lista de espera

Data	Número de cirurgias em lista de espera
1 de novembro de 2013	4574
3 de janeiro de 2014	4276
2 de janeiro de 2015	5689
27 de fevereiro de 2015	6395

Na Figura 3.1, é possível observar a evolução da lista de espera para as 4 especialidades com mais cirurgias por agendar. Pode notar-se que, de novembro de 2013 para janeiro de 2014, em geral, o número de cirurgias em lista de espera por especialidade apresentou uma tendência de diminuição, como é também visível na Tabela 3.1. Mas, a partir de 2014, o número de cirurgias em lista de espera aumentou significativamente. Por exemplo, considerando a Cirurgia 3B, no espaço temporal de 1 ano, o número de cirurgias em lista de espera aumentou aproximadamente 100% e, do início de janeiro de 2015 até ao final de fevereiro do mesmo ano, aumentou aproximadamente 20%.

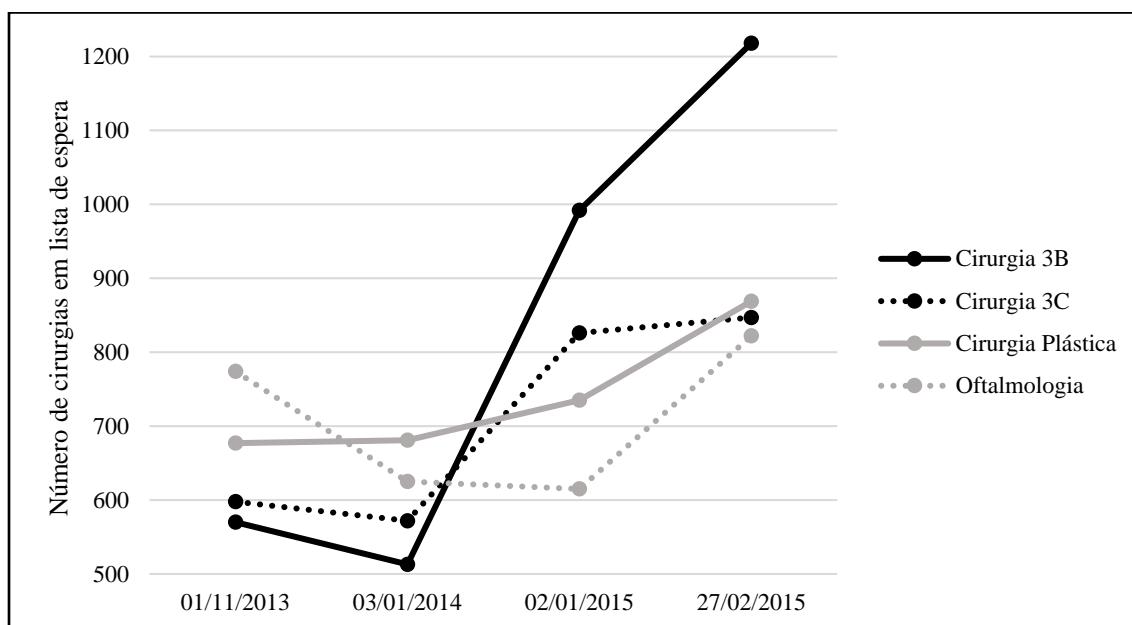


Figura 3.1. Evolução da lista de espera para as quatro especialidades com mais cirurgias por agendar

Tabela 3.2. Evolução da lista de espera de acordo com a prioridade

Data	Prioridade 1	Prioridade 2	Prioridade 3	Prioridade 4
1 de novembro de 2013	4390	143	20	21
3 de janeiro de 2014	4091	150	12	23
2 de janeiro de 2015	5398	223	29	39
27 de fevereiro de 2015	6107	238	22	28

Na Tabela 3.2, é possível observar o número de cirurgias em lista de espera, na data indicada, de acordo com o nível de prioridade. É possível verificar que as cirurgias de prioridade 1 representam mais de 95% das cirurgias em lista de espera. Seguem-se as cirurgias de prioridade 2. No que respeita a cirurgias de prioridade 3 e 4 (cirurgias muito prioritárias e cirurgias urgentes diferidas), representam menos de 1% das cirurgias em lista de espera. Em geral, as cirurgias de prioridade 1 e 2 em lista de espera estão tendencialmente a aumentar, mas, no que respeita às cirurgias de prioridade 3 e 4, o número de cirurgias em lista de espera mantém-se idêntico, ao longo dos anos analisados.

O aumento da lista de espera, para além de ser um grande inconveniente para os pacientes que estão a aguardar cirurgias, também é inconveniente para o hospital e para as metas que este tem em vista alcançar.

Para além do grande número de cirurgias em lista de espera, existem cirurgias em lista de espera há mais tempo do que é estipulado de acordo com o seu grau de prioridade, como pode ser observado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Evolução da percentagem de cirurgias fora de prazo

Data	Percentagem de cirurgias fora de prazo
1 de novembro de 2013	13.7 %
3 de janeiro de 2014	14.0 %
2 de janeiro de 2015	14.0 %
27 de fevereiro de 2015	12.2 %

Para além da percentagem de cirurgias fora de prazo ser significativa, no horizonte temporal estudado, o número médio de dias em lista de espera para além do prazo limite clinicamente aceitável é elevado, como apresentado na Tabela 3.4. Mas, desde 1 de novembro de 2013, este número tem diminuído, indicando que a gestão da escolha dos pacientes a ser operados tem vindo a melhorar, ao longo dos anos.

Tabela 3.4. Evolução do número médio de dias fora de prazo de uma cirurgia em lista de espera

Data	Número médio de dias em lista de espera fora de prazo
1 de novembro de 2013	165
3 de janeiro de 2014	130
2 de janeiro de 2015	88
27 de fevereiro de 2015	89

No que diz respeito às cirurgias realizadas, entre janeiro de 2013 e maio de 2015, foram considerados, para cada cirurgia: o tempo total que o paciente esteve na sala do bloco operatório e o tempo que a intervenção durou (o tempo que o cirurgião esteve presente na sala). Durante o intervalo de tempo considerado, foram realizadas 32851 cirurgias, por 180 cirurgiões. Das 32851 cirurgias efetuadas, existiram 1744 procedimentos cirúrgicos diferentes.

As cirurgias apresentam uma duração estocástica uma vez que dependem de diversos fatores, como por exemplo: experiência do cirurgião, estado clínico do paciente, procedimento cirúrgico a realizar, entre outros. Mas, para planear as cirurgias a realizar, é necessário saber à partida a duração das cirurgias de modo a assegurar que as cirurgias selecionadas podem ser todas efetuadas no tempo disponível das salas e de maneira a que os recursos disponíveis não fiquem com uma baixa taxa de ocupação, com vista a garantir uma boa gestão dos recursos.

Assim, através dos dados do histórico, pretendeu-se obter uma boa estimativa da duração das cirurgias. Pelo histórico, poder-se-ia considerar, para cada cirurgião e para cada procedimento cirúrgico, uma média da duração da cirurgia, mas, com os dados existentes, existiam muitas combinações de cirurgiões e procedimentos que foram realizados. Muitas destas combinações foram observadas apenas 1 ou 2 vezes. Logo, não é viável a utilização da média da duração das cirurgias realizadas pelo mesmo cirurgião efetuando o mesmo procedimento cirúrgico.

Portanto, optou-se por utilizar a duração média para cada procedimento, e assim obter uma estimação da duração de cada cirurgia dependente exclusivamente do procedimento a ser realizado.

Apesar desta escolha ser a mais adequada para os dados disponíveis, dos 1744 procedimentos realizados, 1090 só foram realizados entre 1 a 5 vezes. Ou seja, mesmo com esta opção, a duração média que se utiliza neste trabalho pode ser bastante diferente da que se irá verificar nas cirurgias futuras. Tal acontece devido à existência de procedimentos que são poucas vezes realizados no espaço de 2 anos. Por outro lado, existem 60 procedimentos que foram realizados mais do que 100 vezes.

Para ilustrar as durações obtidas para um determinado procedimento, são apresentadas na Figura 3.2 as durações de um procedimento realizado 30 vezes, de janeiro de 2013 a maio de 2015. É possível observar que, das 30 cirurgias realizadas, a duração da intervenção cirúrgica, em minutos, variou no intervalo [5, 55] e o tempo total do paciente na sala, no intervalo [13, 91]. Ou seja, para a intervenção

cirúrgica e para o tempo total do paciente na sala, o desvio padrão é relativamente elevado (11.5 e 15.1, respetivamente) e a média é aproximadamente de 30 e 51.5, respetivamente. Assim, utilizando as médias, pode estar a considerar-se um valor da duração acima do que efetivamente será necessário, como pode estar a considerar-se um valor abaixo da duração real (desconhecida).

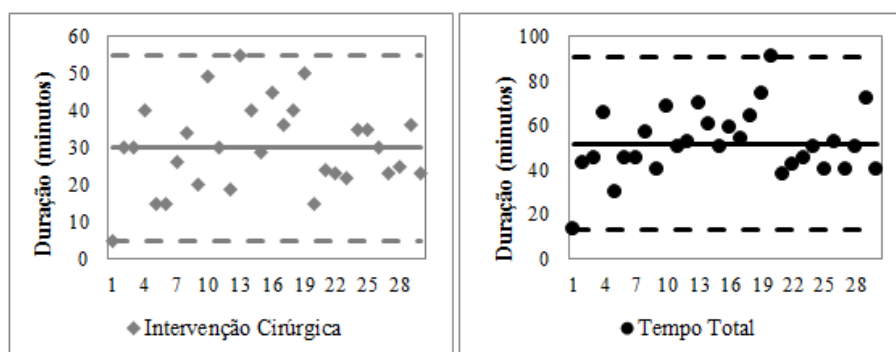


Figura 3.2. Exemplo, para um determinado procedimento, do tempo da intervenção cirúrgica e do tempo total do paciente na sala, para 30 cirurgias realizadas

3.3. Instâncias

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas 4 instâncias reais que representam a lista de espera a uma sexta-feira e o objetivo é realizar o planeamento cirúrgico para a semana seguinte, seguindo o MSS definido pelo hospital para a semana em causa.

Na Tabela 3.5 está apresentada a designação dada a cada instância, o primeiro dia da semana de planeamento a que esta instância se refere e a lista de espera utilizada para cada instância (como o primeiro dia da semana de planeamento é sempre segunda-feira, então a lista de espera utilizada para cada instância refere-se à lista de espera na data da sexta-feira anterior). Mais informações sobre, por exemplo, o número de cirurgias em cada lista de espera, já foram dadas na secção anterior.

Tabela 3.5. Informações referentes às instâncias utilizadas

Designação	Primeiro dia do Planeamento	Data da lista de espera utilizada
S1_04.11.13	4 de novembro de 2013	1 de novembro de 2013
S2_06.01.14	6 de janeiro de 2014	3 de janeiro de 2014
S3_05.01.15	5 de janeiro de 2015	2 de janeiro de 2015
S4_02.03.15	2 de março de 2015	27 de fevereiro de 2015

Para cada cirurgia em lista de espera, é necessário saber a especialidade a que pertence a cirurgia, o cirurgião que irá realizar a cirurgia, a data em que a cirurgia deu entrada na lista de espera, o nível de prioridade da cirurgia e as estimativas do tempo da intervenção cirúrgica e do tempo total que o paciente deverá permanecer na sala (calculados com base na média, de acordo com o procedimento cirúrgico a realizar).

A cada instância está associado o MSS que estava em vigor à data do planeamento. Às instâncias S1_04.11.13 e S2_06.01.14 está associado o MSS apresentado na Figura 3.3, à instância S3_05.01.15 está associado o MSS apresentado na Figura 3.4 e, por fim, à instância S4_02.03.15 está associado o MSS apresentado na Figura 3.5. Cada uma das células afetas a uma especialidade corresponde a um bloco de tempo disponível no dia e turno correspondente.

Todas as instâncias têm em comum o tempo de limpeza associado a cada especialidade, dado pelo hospital em estudo, e a capacidade das salas de operação, sendo esta diferente para o turno da manhã (405 minutos) e para o turno da tarde (360 minutos).

Por fim, é necessário saber, à partida, a disponibilidade dos cirurgiões e, caso estejam disponíveis para realizar intervenções cirúrgicas num determinado dia da semana, o seu limite diário e semanal de horas de trabalho em cirurgia.

Sala	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta
Turnos da Manhã (8h15-15h)					
1	CPD	OTO	CPD	OTO	
2	OTO	OTO	OTO	OTO	
3	ORTb	ORTa	ORTb	CPL	
4	ORTb	ORTa	ORTb	ORTa	ORTa
5	URO	URO	URO	URO	C3b
6	OFT	OFT	OFT	OFT	OFT
7	Cirurgias Urgentes				
8	GIN	GIN	GIN	GIN	GIN
9	C3b	C3b	C3b	C3b	C3b
10	C3c	C3c	C3c	C3c	C3c
11	CMF	CPL	URO	URO	GIN
Turnos da Tarde (15h-21h)					
1					
2	OTO		OTO		OTO
3		C3b			
4	ORTb	ORTa	ORTb	ORTa	ORTb
5	URO	URO	C3b	C3c	URO
6	OFT	OFT	OFT	OFT	OFT
7	Cirurgias Urgentes				
8	C3c	C3c	CPD	GIN	
9	C3b	C3b	C3b	C3b	C3b
10	CPL	CPL	C3c	CPL	C3c
11	CPL	CPL	CMF	CPL	

Figura 3.3. MSS de novembro de 2013 a janeiro de 2014

Sala	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta
Turnos da Manhã (8h15-15h)					
1	CPD	OTO	CPD	OTO	OTO
2	OTO	OTO	OTO	OTO	
3	ORTb	ORTa	ORTb	CPL	ORTb
4	ORTb	ORTa	ORTb	ORTa	ORTa
5	URO	URO	URO	URO	C3b
6	OFT	OFT	OFT	OFT	OFT
7	Cirurgias Urgentes				
8	GIN	GIN	GIN	GIN	GIN
9	C3b	C3b	C3b	C3b	C3b
10	C3c	C3c	C3c	C3c	C3c
11	CMF	CPL	URO	URO	GIN
Turnos da Tarde (15h-21h)					
1					
2					
3					
4					
5					
6	OFT				
7	Cirurgias Urgentes				
8				GIN	
9					
10					
11			CMF		

Figura 3.4. MSS de janeiro de 2015

Sala	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta
Turnos da Manhã (8h15-15h)					
1	CPD	OTO	CPD	OTO	OTO
2	OTO	OTO	OTO	OTO	
3	ORTb	ORTa	ORTb	CPL	ORTb
4	ORTb	ORTa	ORTb	ORTa	ORTa
5	URO	URO	URO	URO	C3b
6	OFT	OFT	OFT	OFT	OFT
7	Cirurgias Urgentes				
8	GIN	GIN	GIN	GIN	GIN
9	C3b	C3b	C3b	C3b	C3b
10	C3c	C3c	C3c	C3c	C3c
11	CMF	CPL	URO	URO	GIN
Turnos da Tarde (15h-21h)					
1			CPD		
2					
3					
4	ORTb	ORTa	ORTb	ORTa	
5	URO				
6					
7	Cirurgias Urgentes				
8				GIN	
9	C3b	C3b	C3b	C3b	C3b
10	C3c	C3c	C3c	C3c	C3c
11			CMF		

Figura 3.5. MSS de março de 2015

3.4. Modelos matemáticos

Considerando as três versões para o problema estudado por Marques e Captivo [17], foi utilizada a seguinte notação para a formulação dos respetivos modelos: conjuntos e índices (Tabela 3.6), subconjuntos (Tabela 3.7) e parâmetros do problema (Tabela 3.8).

Tabela 3.6. Conjuntos e índices dos Modelos Matemáticos

$c \in C$	Cirurgias eletivas em lista de espera
$s \in S$	Especialidades cirúrgicas
$h \in H$	Cirurgiões
$d \in D$	Dias disponíveis para marcação
$b \in B_d$	Blocos de tempo disponíveis no dia d

Tabela 3.7. Subconjuntos dos Modelos Matemáticos

C_d^P	Cirurgias urgentes diferidas com a data limite no dia d do horizonte de planeamento
C^{NP}	Cirurgias com a data limite fora do horizonte de planeamento ou cirurgias que não sejam urgentes diferidas
C_{sd}	Cirurgias pertencentes à especialidade s que podem ser agendadas para o dia d
D_c	Dias disponíveis para agendar a cirurgia c
B_d^M	Blocos de tempo disponíveis no dia d no turno da manhã
B_d^A	Blocos de tempo disponíveis no dia d no turno da tarde

Tabela 3.8. Parâmetros dos Modelos Matemáticos

dd_c	Data limite da cirurgia c
d_1	Primeiro dia do horizonte de planeamento (segunda-feira)
wl_c	Número de dias que a cirurgia c está em lista de espera no primeiro dia de planeamento
wl_c^{MAX}	Número máximo de dias que a cirurgia c deve estar em lista de espera
s_c	Especialidade cirúrgica da cirurgia c
h_c	Cirurgião responsável pela cirurgia c
w_c	Penalidade por não agendar a cirurgia c
p_c	Nível de prioridade da cirurgia c
t_c^{TOT}	Tempo total de ocupação da cirurgia c numa sala do bloco operatório (minutos)
t_c^{SRG}	Tempo da intervenção cirúrgica da cirurgia c (minutos)
t_c^{CLN}	Tempo de limpeza após cirurgia c (minutos)
a_{db}^s	1, se o bloco b no dia d está afeto à especialidade cirúrgica s ; 0, caso contrário
k_{db}^B	Capacidade do bloco de tempo b no dia d (minutos)
k^{BM}	Capacidade dos blocos de tempo no turno da manhã (minutos)
k^{BA}	Capacidade dos blocos de tempo no turno da tarde (minutos)
k_{hd}^{HD}	Capacidade do cirurgião h para operar no dia d (minutos)
k_h^{Hw}	Capacidade do cirurgião h para operar durante o horizonte de planeamento (minutos)
M	Big-M

Na notação utilizada, é considerado que o horizonte de planeamento corresponde aos dias úteis de uma semana, de segunda-feira a sexta-feira, e que, em cada dia, existem blocos de tempo disponíveis. De acordo com os MSS, em cada dia, existem 10 salas disponíveis para marcação de cirurgias eletivas logo, existem, no máximo, 10 blocos de tempo disponíveis para marcação de cirurgias de manhã e outros 10 blocos de tempo disponíveis à tarde.

Assim, independentemente da instância considerada, o número de especialidades cirúrgicas, o número de dias disponíveis para marcação e o número de blocos de tempo disponíveis em cada dia estão limitados ($|S| \leq 11$, $|D| \leq 5$ e $|B_d| \leq 20$ ($\forall d \in D$)). O número de cirurgias eletivas ($|C|$) e o número de cirurgiões ($|H|$) dependem da instância a utilizar.

Os conjuntos C e B_d correspondem, respetivamente, às cirurgias eletivas em lista de espera e aos blocos de tempo disponíveis no dia d . São divididos em dois subconjuntos. O conjunto C é dividido entre as cirurgias urgentes diferidas cujo tempo máximo de resposta termina no horizonte de planeamento e as restantes: C_d^P e C^{NP} , respetivamente ($(\cup_{d \in D} C_d^P) \cup C^{NP} = C$). O conjunto B_d é dividido entre os blocos de tempo disponíveis no turno da manhã e os blocos de tempo disponíveis no turno da tarde: B_d^M e B_d^A , respetivamente ($B_d^M \cup B_d^A = B_d$).

Os parâmetros dos modelos fazem parte dos dados das instâncias exceto os três parâmetros dd_c , wl_c e w_c que são calculados com base nos dados das instâncias, antes da execução dos modelos.

A data de entrada de uma cirurgia c em lista de espera é representada por de_c . O número máximo de dias que a cirurgia c pode estar em lista de espera (wl_c^{MAX}) depende da prioridade da cirurgia, como já foi referido anteriormente na descrição do problema ($wl_c^{MAX} = 3$ se $p_c = 4$; $wl_c^{MAX} = 15$ se $p_c = 3$; $wl_c^{MAX} = 60$ se $p_c = 2$; $wl_c^{MAX} = 270$, se $p_c = 1$).

Assim, os parâmetros dos modelos referentes à data limite das cirurgias e ao número de dias que as cirurgias estão em lista de espera, são previamente calculados da seguinte forma:

- $dd_c = de_c + wl_c^{MAX}, \forall c \in C$
- $wl_c = d_1 - de_c, \forall c \in C$

O parâmetro penalidade por não agendar a cirurgia c (w_c) é utilizado na VA de forma a obrigar a marcação das cirurgias considerando o número de dias que faltam para a data limite ($dd_c - d_1$). Para tal, é considerada uma penalidade (*Penalidade*) relacionada com os dias que faltam para a data limite, de acordo com a Figura 3.6. Posteriormente, para que a penalidade por não marcar uma cirurgia seja superior à penalização por marcar a cirurgia (explicado mais à frente na função objetivo da VA) é considerado: $w_c = 1.2 \times \max_{c \in C}(dd_c - d_1) + Penalidade$.

Assim, se, por exemplo, $\max_{c \in C}(dd_c - d_1) = 261$ para uma cirurgia cujo prazo limite termine em 24 dias ($24 \in [15, 29[$), considera-se $w_c = 1.2 \times 261 + 150$; mas, por exemplo, para uma cirurgia que já devia ter sido realizada e por isso o número de dias até à data limite é negativo ($]-\infty, 0[$), considera-se a penalidade por não marcar a cirurgia c : $w_c = 1.2 \times 261 + 2000$.

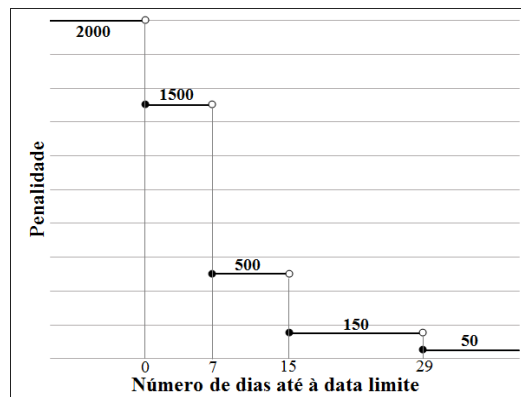


Figura 3.6. Penalidade em função do número de dias até à data limite

Para as três versões do problema, Marques e Captivo [17] definem dois conjuntos de variáveis:

- $x_{cdb} = \begin{cases} 1, & \text{se a cirurgia } c \text{ é marcada para o bloco } b \text{ no dia } d \\ 0, & \text{caso contrário } (\forall c \in C, d \in D_c, b \in B_d) \end{cases}$
- $z_c = \begin{cases} 1, & \text{se a cirurgia } c \text{ não é marcada} \\ 0, & \text{caso contrário } (\forall c \in C^{NP}) \end{cases}$

Como as cirurgias urgentes diferidas (prioridade 4) com a data limite no horizonte de planeamento são marcadas obrigatoriamente, não é considerada a variável z_c para $c \in C_d^P$.

As variáveis x_{cdb} são as variáveis de decisão do problema e as variáveis z_c são variáveis auxiliares. São utilizadas as variáveis auxiliares de forma a facilitar a escrita dos modelos, mas estas são desnecessárias para o problema uma vez que podem escrever-se em função das variáveis x_{cdb} : $z_c = 1 - \sum_{d \in D_c} \sum_{b \in B_d} x_{cdb}$, $\forall c \in C^{NP}$.

3.4.1. Versão Administração

A Versão Administração (VA) seleciona os pacientes de acordo com a prioridade da cirurgia e a sua antiguidade na lista de espera, pretendendo assim atingir as metas definidas pelo Ministério da Saúde e assegurar um serviço cirúrgico eficiente e equitativo. Para tal, Marques e Captivo [17] consideram a seguinte formulação em programação linear inteira mista para esta versão do problema:

$$\min \sum_{c \in C} \sum_{d \in D_c} \sum_{b \in B_d} [(dd_c - d_1) + d] x_{cdb} + \sum_{c \in C^{NP}} p_c w_c z_c \quad (3.1)$$

$$\text{s.a: } \sum_{d' \in D_c} \sum_{b \in B_d} x_{cd'b} = 1, \forall c \in C_d^P, d \in D \quad (3.2)$$

$$\sum_{d \in D_c} \sum_{b \in B_d} x_{cdb} + z_c = 1, \forall c \in C^{NP} \quad (3.3)$$

$$\sum_{c \in C_{sd}} x_{cdb} \leq a_{db}^s M, \forall s \in S, d \in D, b \in B_d \quad (3.4)$$

$$\sum_{c \in C_{sd}} (t_c^{TOT} + t_c^{CLN}) x_{cdb} \leq k_{db}^B, \forall d \in D, b \in B_d, \text{ para } s: a_{db}^s = 1 \quad (3.5)$$

$$\sum_{c \in C: h_c=h, d \in D_c} \sum_{b \in B_d} t_c^{SRG} x_{cdb} \leq k_{hd}^H, \forall h \in H, d \in D \quad (3.6)$$

$$\sum_{c \in C: h_c=h, d \in D_c} \sum_{b \in B_d^M} t_c^{SRG} x_{cdb} \leq k^{BM}, \forall h \in H, d \in D \quad (3.7)$$

$$\sum_{c \in C: h_c=h, d \in D_c} \sum_{b \in B_d^A} t_c^{SRG} x_{cdb} \leq k^{BA}, \forall h \in H, d \in D \quad (3.8)$$

$$\sum_{c \in C: h_c=h} \sum_{d \in D_c} \sum_{b \in B_d} t_c^{SRG} x_{cdb} \leq k_h^{Hw}, \forall h \in H \quad (3.9)$$

$$x_{cdb} \in \{0, 1\}, \forall c \in C, d \in D_c, b \in B_d \quad (3.10)$$

$$z_c \geq 0, \forall c \in C^{NP} \quad (3.11)$$

A função objetivo (3.1) considera dois critérios: obrigar a marcar as cirurgias com maior relação de prioridade e penalidade por não serem marcadas, minimizando para isso a soma ponderada dos coeficientes das cirurgias não marcadas ($p_c w_c$); obrigar a que cirurgias com a mesma prioridade sejam marcadas de acordo com a ordem de entrada na lista de espera, minimizando para isso a soma do número de dias disponíveis até à data limite ($dd_c - d_1$), e adiciona-se d de forma a ser preferível marcar as cirurgias no início da semana em vez do final da semana. Para que as cirurgias sejam marcadas de acordo com a penalidade por não marcar e prioridade, é necessário que estes coeficientes ($p_c w_c$) sejam superiores ao número de dias disponíveis para marcação ($dd_c - d_1$) e, para tal acontecer, o parâmetro w_c é definido por $1.2 * \max_{c \in C} (dd_c - d_1)$, como referido anteriormente.

As cirurgias urgentes diferidas, com a data limite durante o horizonte de planeamento (segunda-feira), são agendadas obrigatoriamente para o dia do horizonte de planeamento em que termina a data limite (segunda-feira). Tal é garantido pelas restrições (3.2). As restantes cirurgias podem ou não ser marcadas no horizonte de planeamento e, para tal, as restrições (3.3) ligam os dois conjuntos de variáveis do modelo.

As restrições (3.4) obrigam a que o agendamento cirúrgico seja realizado de acordo com o MSS, isto é, que uma cirurgia seja marcada para um bloco de tempo que esteja afeto à sua especialidade.

As restrições (3.5) garantem que a duração das cirurgias marcadas para um determinado bloco de tempo não excede a respetiva capacidade, considerando o tempo total da cirurgia (t_c^{TOT}) e o tempo de limpeza (t_c^{CLN}).

As restrições (3.6) - (3.9) dizem respeito à verificação da capacidade máxima dos cirurgiões em termos diários e semanais. As restrições (3.6) garantem que a capacidade diária dos cirurgiões (k_{hd}^{HD}) não é ultrapassada. Para além de ser necessário garantir que a capacidade diária não é ultrapassada, é também necessário garantir que os cirurgiões não têm sobreposições de tempo cirúrgico. Assim, deve ser garantido que o tempo de cirurgia que um cirurgião trabalha, por turno, não é superior à capacidade de qualquer das salas. Como a capacidade das salas do turno da manhã (k^{BM}) é diferente da capacidade das salas do turno da tarde (k^{BA}), então utilizam-se as restrições (3.7) que apenas consideram as cirurgias realizadas nos blocos de tempo associados ao turno da manhã e as restrições (3.8) que consideram as cirurgias realizadas nos blocos de tempo associados ao turno da tarde. As restrições (3.9) garantem que o tempo de cirurgia de um cirurgião não ultrapassa a sua capacidade semanal (k_h^{HW}).

Nas instâncias utilizadas, tem-se sempre $k^{BM} \geq k_{hd}^{HD}$ e $k^{BA} \geq k_{hd}^{HD}$ (a duração de qualquer turno nunca é inferior à capacidade diária do tempo de cirurgia dos cirurgiões), logo as restrições (3.7) e (3.8) não são necessárias uma vez que as restrições (3.6) já garantem a não existência de sobreposições.

Por fim, as restrições (3.10) e (3.11) expressam o domínio das variáveis, onde x_{cdb} são variáveis binárias e z_c reais não negativas, respetivamente. Com as restrições (3.3) e, apesar de não ser necessário impor, z_c terá valor 0 ou 1, $\forall c \in C^{NP}$.

3.4.2. Versão Cirurgiões

Uma vez que os resultados obtidos por Marques e Captivo [17] para a Versão Administração foram muito diferentes do que se encontrava em funcionamento no hospital, foi elaborada uma nova versão de modo a tentar representar o melhor possível o que foi realizado pelo hospital nas datas consideradas. Analisando os planos feitos pelo hospital nas datas referidas, verificou-se que os pacientes selecionados correspondem, em larga medida, aos pacientes mais recentes na lista de espera.

Isto justifica-se por os cirurgiões se recordarem melhor dos últimos doentes que observaram. Assim, nesta versão, os pacientes são selecionados pela ordem inversa de entrada na lista de espera.

Os turnos da manhã desta versão seguem as mesmas regras da VA (restrições) mas o objetivo é agendar os pacientes mais recentes que entraram na lista de espera de modo a imitar a “falta de memória” dos cirurgiões e a sua tendência para marcar os pacientes que viram há menos tempo.

No âmbito do programa de incentivo à redução das listas de espera, para os turnos da tarde, a administração do hospital deu liberdade aos cirurgiões para trabalhar sem limitações de horário e pagando aos cirurgiões pelo número de intervenções cirúrgicas realizadas. Assim, o objetivo é maximizar o número de cirurgias realizadas, mas considerando como prioridade as colocadas na lista de espera há menos tempo.

As duas formulações consideradas para esta versão do problema por Marques e Captivo [17] foram as seguintes:

Turnos da Manhã (TM)

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{c \in C} \sum_{d \in D_c} \sum_{b \in B_d} (wl_c + d) x_{cdb} + \sum_{c \in C^{NP}} (2 \max_{c \in C} (wl_c) - wl_c + (|D| + 2)) z_c \quad (3.12) \\ \text{s.a:} \quad & (3.2) - (3.7), (3.9) - (3.11) \end{aligned}$$

Turnos da Tarde (TT)

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{c \in C} \sum_{d \in D_c} \sum_{b \in B_d} \left(1 - \frac{wl_c}{1 + \max_{c \in C} (wl_c)} \right) x_{cdb} \quad (3.13) \\ \text{s.a:} \quad & (3.2), (3.4), (3.5), (3.8), (3.10) \end{aligned}$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{b \in B_d} x_{cdb} \leq 1, \forall c \in C^{NP} \quad (3.14)$$

Para os turnos da manhã, a função objetivo (3.12) pretende refletir a prática do hospital e, para tal, o número de dias em lista de espera no primeiro dia do horizonte de planeamento é minimizado (wl_c), permitindo assim que os pacientes sejam marcados pela ordem inversa de entrada na lista de espera. Adiciona-se o parâmetro d de forma a ser preferível marcar as cirurgias no início da semana. Para obrigar a que as cirurgias sejam marcadas existe uma penalização para as cirurgias não marcadas. Esta penalização depende dos dias em lista de espera no primeiro dia do horizonte de planeamento e, tal como na VA, os coeficientes por não marcar cirurgias são superiores aos coeficientes por marcar. Para tal, é considerado $2 \max_{c \in C} (wl_c)$. Como neste problema o horizonte de planeamento corresponde aos dias úteis da semana, então $|D| + 2 = 7$.

As restrições associadas ao turno da manhã são as mesmas da VA, exceto a restrição que diz respeito à marcação de cirurgias no turno da tarde (3.8).

Para os turnos da tarde, a função objetivo (3.13) tem a intenção de maximizar o número de cirurgias marcadas, considerando que devem ser preferencialmente marcados os pacientes que os cirurgiões viram há menos tempo, ou seja, os últimos a entrar na lista de espera. Para tal, é minimizado um fator, correspondente a cada cirurgia marcada, que considera o quociente entre o número de dias em espera (wl_c) e o número máximo de dias em espera entre as cirurgias da lista de espera, acrescido de uma unidade de modo a evitar coeficientes nulos ($1 + \max_{c \in C} (wl_c)$).

Como não são utilizadas as variáveis z_c , as restrições de ligação (3.3) já não são utilizadas, passando a ser necessário garantir que uma determinada cirurgia só pode ser agendada num único bloco de tempo durante o horizonte de planeamento (3.14). Como no turno da tarde os cirurgiões não têm um limite de horas diário nem semanal, as restrições (3.6) e (3.9) não são incluídas. As restantes restrições (3.2), (3.4), (3.5), (3.8) e (3.10) continuam a ser consideradas.

3.4.3. Versão Mista

A Versão Mista (VM) pretende ser uma conjunção das duas versões anteriores e, para isso, foi considerado que, nos turnos da manhã, selecionam-se os pacientes de acordo com a prioridade e a antiguidade na lista de espera e, nos turnos da tarde, selecionam-se os pacientes pela ordem inversa de entrada na lista de espera, de forma a maximizar os recursos disponíveis no bloco operatório. Para tal, Marques e Captivo [17], consideram as duas seguintes formulações:

Turnos da Manhã (TM)

$$\begin{aligned} \min & \quad (3.1) \\ \text{s.a:} & \quad (3.2) - (3.7), (3.9) - (3.11) \end{aligned}$$

Turnos da Tarde (TT)

$$\begin{aligned} \max & \quad (3.13) \\ \text{s.a:} & \quad (3.2), (3.4), (3.5), (3.8), (3.10), (3.14) \end{aligned}$$

3.5. Observações

Os modelos matemáticos atrás apresentados consideram, simultaneamente, todas as especialidades. Na Tabela 3.9, é apresentado o número de variáveis e o número de restrições para a VA, para as 4 instâncias utilizadas, que considera a marcação simultânea para os dois turnos. É possível observar que o número total de variáveis é bastante elevado, devido às inúmeras possibilidades de agendamento das cirurgias ao longo da semana. O número de restrições também é bastante elevado e é possível notar que, para as 4 instâncias consideradas, apenas 2 apresentam na sua lista de espera cirurgias urgentes diferidas com prazo de validade no horizonte de planeamento (3.2) e que, como já referido anteriormente, o número de restrições (3.7) e (3.8) são 0 uma vez que as restrições (3.6) já asseguram o que é garantido pelas (3.7) e (3.8).

Na Tabela 3.10, é apresentado o número de variáveis e restrições para as formulações associadas aos turnos da manhã da VC e da VM. O número de variáveis x é substancialmente inferior ao número de variáveis da VA. Tal acontece devido a serem considerados menos blocos de tempo (apenas os da manhã). Mas o número de variáveis z é igual ao da VA porque se considera a mesma lista de espera, e o número de restrições é bastante idêntico; apenas são consideradas menos restrições dos grupos (3.4) e (3.5) por existirem menos blocos disponíveis. Apesar de, no geral, estas duas versões apresentarem, para os turnos da manhã, menos variáveis e restrições, o problema continua a ser bastante complexo devido ao elevado número de variáveis e restrições.

Em relação aos turnos da tarde para a VC e para a VM, os modelos contêm menos variáveis e restrições do que as apresentadas na Tabela 3.10 pois a lista de espera utilizada nos turnos da tarde é igual à do turno da manhã eliminando as cirurgias já agendadas no turno da manhã. Ou seja, existirão

menos cirurgias em lista de espera, o que resulta em menos variáveis e menos restrições. Mas, devido ao elevado número de combinações possíveis, os modelos matemáticos continuam a ser de difícil resolução.

Tabela 3.9. Número de variáveis e restrições para a Versão Administração (todas as cirurgias)

	Variáveis			Restrições								
	x	z	Total	(3.2)	(3.3)	(3.4)	(3.5)	(3.6)	(3.7)	(3.8)	(3.9)	Total
S1_04.11.13	384084	4572	388656	2	4572	924	84	640	0	0	128	6350
S2_06.01.14	359184	4276	363460	0	4276	924	84	625	0	0	125	6034
S3_05.01.15	295828	5689	301517	0	5689	572	52	610	0	0	122	7045
S4_02.03.15	428359	6393	434752	2	6393	737	67	500	0	0	100	7799

Tabela 3.10. Número de variáveis e restrições para a Versão Cirurgiões e para a Versão Mista – Turnos da Manhã (todas as cirurgias)

	Variáveis			Restrições								
	x	z	Total	(3.2)	(3.3)	(3.4)	(3.5)	(3.6)	(3.7)	(3.8)	(3.9)	Total
S1_04.11.13	214904	4572	219476	2	4572	517	47	640	0	0	128	5906
S2_06.01.14	200972	4276	205248	0	4276	517	47	625	0	0	125	5590
S3_05.01.15	278761	5689	284450	0	5689	539	49	610	0	0	122	7009
S4_02.03.15	313277	6393	319670	2	6393	539	49	500	0	0	100	7583

Assim, devido à complexidade do problema, Marques e Captivo [17] desenvolveram um procedimento que torna a resolução computacionalmente mais fácil. O procedimento é apresentado no Algoritmo 3.1 e o seu objetivo é desagregar o problema pelas diferentes especialidades. Caso as especialidades tenham cirurgiões em comum, é necessário avaliar se as especialidades têm blocos de tempo simultâneos ou se os cirurgiões em comum realizam cirurgias para estas especialidades de forma a ser garantido que os cirurgiões não tenham sobreposições de tempo cirúrgico.

De acordo com o algoritmo, os modelos são executados separadamente para cada especialidade, exceto se existirem cirurgiões com intervenções cirúrgicas em mais do que uma especialidade. Neste caso, se a percentagem de cirurgias pertencentes aos cirurgiões em comum é pelo menos 1% das cirurgias em lista de espera e se as especialidades em causa estiverem afetadas a salas que operam no mesmo turno, então o agendamento semanal para estas especialidades é realizado em simultâneo num só modelo matemático. Tal verifica-se para as especialidades: C3b + C3c (S1_04.11.13 e S2_06.01.14); ORTa + ORTb (S2_06.01.14); C3b + C3c + OFT (S3_05.01.15); C3b + C3c + ORTb (S4_02.03.15); CPL + OFT (S4_02.03.15). Caso a percentagem de cirurgias pertencentes aos cirurgiões em comum seja inferior a 1% ou caso as especialidades em causa não estejam em simultâneo no bloco operatório, é resolvido o modelo matemático separadamente para estas especialidades cirúrgicas, por ordem decrescente de percentagem de cirurgias na lista de espera com cirurgiões em comum. Neste caso, antes de ser resolvido o modelo matemático para a especialidade seguinte, é necessário atualizar as capacidades diárias e semanais dos cirurgiões. Esta situação ocorre com as especialidades: ORTa → ORTb (S1_04.11.13); CMF → C3b + C3c + ORTb → ORTa (S4_02.03.15).

Para a VA, são executados 10 modelos para a instância S1_04.11.13, 9 modelos para as instâncias S2_06.01.14 e S3_05.01.15, e 8 modelos para a instância S4_02.03.15. A média do número de variáveis e restrições dos modelos, é apresentada na Tabela 3.11. É possível notar uma grande redução do número médio de variáveis e restrições dos modelos quando comparado com a Tabela 3.9, sendo a

dimensão do problema bastante diferente quando se considera as especialidades integradas ou a maioria das especialidades separadas.

Algoritmo 3.1. Pseudo-código do algoritmo para obter a solução ótima do problema

Input: Dados definidos nas Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8.

Output: Agenda Cirúrgica Semanal.

Seja C_{hs}^{HS} o subconjunto de cirurgias pertencentes à especialidade s com a responsabilidade do cirurgião h e C_s^S o subconjunto de cirurgias pertencentes à especialidade s .

```

1: Inicializar  $S^* = \emptyset$  e  $C_{hs}^{HS} = \emptyset, \forall h \in H, s \in S$ .
2: while  $|S| \neq 0$  do
3:   Escolher uma especialidade  $s \in S$ .
4:   for all  $c_1, c_2 \in C$  do
5:     if  $h_{c_1} = h_{c_2}, s_{c_1} = s, s_{c_2} \neq s$  then
6:        $S^* \leftarrow S^* \cup \{s_{c_2}\}, C_{h_{c_1}s}^{HS} \leftarrow C_{h_{c_1}s}^{HS} \cup \{c_1\}$  e  $C_{h_{c_2}s_{c_2}}^{HS} \leftarrow C_{h_{c_2}s_{c_2}}^{HS} \cup \{c_2\}$ .
7:     end if
8:   end for
9:   if  $S^* = \emptyset$  then
10:    Resolver o modelo matemático para a especialidade  $s$ .
11:     $S \leftarrow S \setminus \{s\}$ .
12:   Else
13:     $S^* \leftarrow S^* \cup \{s\}$ .
14:   if  $(\exists s \in S^*, h \in H: \frac{|C_{hs}^{HS}|}{|C_s^S|} \geq 0.01)$  &  $(\exists s_1, s_2 \in S^*: s_1$  e  $s_2$  têm blocos de tempo simultâneos) then
15:    Resolver o modelo matemático para as especialidades em  $S^*$ .
16:   else
17:    Seja  $S' = S^*$ .
18:    while  $|S'| \neq 0$  do
19:      Escolher  $s^* \in S'$  com maior  $\frac{|C_{hs}^{HS}|}{|C_s^S|}, \forall h \in H, s \in S'$ .
20:      Resolver o modelo matemático para a especialidade  $s^*$ .
21:      Atualizar  $k_{hd}^{HD}$  e  $k_h^{HW}, \forall d \in D, h \in H$ .
22:       $S' \leftarrow S' \setminus \{s^*\}$ .
23:    end while
24:   end if
25:    $S \leftarrow S \setminus S^*$ .
26: end if
27:    $S^* = \emptyset$  e  $C_{hs}^{HS} = \emptyset, \forall h \in H, s \in S$ .
28: end while

```

Tabela 3.11. Número médio de variáveis e restrições para a Versão Administração considerando o Algoritmo 3.1

	Variáveis			Restrições								
	x	z	Total	(3.2)	(3.3)	(3.4)	(3.5)	(3.6)	(3.7)	(3.8)	(3.9)	Total
S1_04.11.13	5441	457	5898	0	457	5	8	59	0	0	13	542
S2_06.01.14	5928	475	6403	0	475	8	9	68	0	0	14	574
S3_05.01.15	6123	632	6755	0	632	5	6	60	0	0	14	717
S4_02.03.15	11896	799	12695	0	799	12	8	61	0	0	13	895

Para a VC e para a VM, o número de modelos executados será, no máximo, o dobro dos executados para a VA pois é necessário executar primeiramente os modelos para o turno da manhã e, posteriormente, os modelos para o turno da tarde. Para os turnos da manhã, é apresentado, na Tabela 3.12, o número médio de variáveis e restrições para as 4 instâncias. É notória a redução destes números comparativamente ao caso em que se considera apenas um modelo integrando todas as especialidades.

Tabela 3.12. Número médio de variáveis e restrições para a Versão Cirurgiões e para a Versão Mista – Turnos da Manhã considerando o Algoritmo 3.1

	Variáveis			Restrições								
	<i>x</i>	<i>z</i>	Total	(3.2)	(3.3)	(3.4)	(3.5)	(3.6)	(3.7)	(3.8)	(3.9)	Total
S1_04.11.13	2788	457	3245	0	457	2	5	59	0	0	13	536
S2_06.01.14	3092	475	3567	0	475	4	5	68	0	0	14	566
S3_05.01.15	6013	632	6645	0	632	5	5	60	0	0	14	716
S4_02.03.15	7934	799	8733	0	799	8	6	61	0	0	13	887

Apesar da dimensão das instâncias ser reduzida com o procedimento de separação das especialidades, os modelos continuam a ter uma elevada dimensão podendo ser difícil a sua resolução computacional. Note-se também que o *software* para a resolução dos modelos pode ser muito caro e de difícil utilização no hospital por parte das pessoas que habitualmente fazem o planeamento das cirurgias.

No capítulo seguinte, são apresentados os resultados obtidos pelo Algoritmo 3.1 para as 3 versões do problema. São também apresentadas as heurísticas desenvolvidas e comparados os resultados.

Capítulo 4

Heurísticas Desenvolvidas

No presente capítulo, são apresentadas várias heurísticas desenvolvidas para obter rapidamente boas soluções para o problema em estudo. Assim, começa-se por explicar a metodologia de resolução usada. De seguida, são descritas as heurísticas construtivas e as heurísticas de melhoramento criadas. Posteriormente, são apresentados os resultados para as instâncias consideradas. Por fim, na última secção, encontram-se algumas conclusões.

4.1. Metodologia de resolução

Para obter rapidamente soluções para o problema, foram desenvolvidas heurísticas que diferem de acordo com a versão do problema considerada. Inicialmente, foram desenvolvidas heurísticas construtivas, de modo a obter soluções admissíveis para o problema. Posteriormente, são aplicadas heurísticas de melhoramento às soluções admissíveis, de forma a alcançar melhores soluções, ou seja, mais próximas de uma solução ótima.

Uma vez que esta metodologia de resolução se baseia em heurísticas construtivas e em heurísticas de melhoramento, é construída uma solução com uma heurística construtiva e, posteriormente, a partir dessa solução, é realizada uma pesquisa local em determinadas vizinhanças, de modo a tentar melhorá-la através de trocas, remoções e inserções, até que já não seja mais possível melhorar com as estruturas de vizinhanças definidas. Com a pesquisa local, chega-se, portanto, à melhor solução no conjunto das vizinhanças consideradas. Quando tal acontece, pode-se estar perante dois casos: a solução obtida é uma solução ótima do problema, ou a solução obtida não é solução ótima do problema e, neste caso, está-se perante um ótimo local, em que a heurística de melhoramento desenvolvida já não consegue melhorar a solução.

Portanto, as heurísticas desenvolvidas conduzem à obtenção de uma solução admissível para o problema, mas não garantidamente uma solução ótima.

Dependendo da versão do problema, o objetivo e as restrições são diferentes. Assim, apesar da lógica inerente às heurísticas ser similar para as três versões, estas diferem no que respeita ao seu critério de otimização e às suas condicionantes.

4.2. Heurísticas construtivas

Foram desenvolvidas duas heurísticas construtivas para cada versão do problema em estudo. A ideia de desenvolver duas heurísticas construtivas surge de forma a ser possível obter duas soluções com valores potencialmente diferentes. Assim, tem-se a possibilidade de escolher a melhor de duas soluções, favorecendo a oportunidade de ser obtida uma melhor solução final para o problema. Neste

capítulo, é utilizada a notação HC_i onde o índice i é igual a 1 quando se trata da heurística construtiva 1, e é igual a 2 quando se trata da heurística construtiva 2.

Nas duas heurísticas construtivas, o objetivo inicial é marcar as cirurgias urgentes diferidas, com a data limite na segunda-feira, para um bloco de tempo disponível à segunda-feira¹. Posteriormente, para as restantes cirurgias, é calculado um coeficiente que permite estabelecer uma ordem de marcação e que depende da versão a utilizar e do turno. As cirurgias são ordenadas por ordem decrescente do coeficiente e são marcadas por essa ordem, nos blocos de tempo disponíveis, considerando as restrições do problema em questão. A única diferença das duas heurísticas construtivas é o coeficiente utilizado.

Para a Versão Administração (VA) e para a Versão Mista - Turnos da Manhã (VM-TM), é considerado um coeficiente associado à não marcação das cirurgias ($p_c w_c$). Todas as cirurgias em lista de espera são ordenadas por ordem decrescente deste valor, dando assim preferência à marcação de cirurgias com uma maior conjugação de prioridade com a penalidade por não marcar a cirurgia.

Para a Versão Cirurgiões - Turnos da Manhã (VC-TM), o coeficiente considerado é a parte da função objetivo que diz respeito à penalização por não marcar uma cirurgia, que depende dos dias em lista de espera, no primeiro dia do horizonte de planeamento ($2 \max_{c \in C}(w l_c) - w l_c + (|D| + 2)$), dando assim preferência à marcação de cirurgias que tenham sido colocadas há menos tempo em lista de espera.

Para a Versão Cirurgiões - Turnos da Tarde (VC-TT) e para a Versão Mista - Turnos da Tarde (VM-TT), é considerada exatamente a função objetivo do modelo, isto é, o coeficiente é igual a um menos o quociente entre o número de dias em espera e o número máximo de dias em espera entre as cirurgias da lista de espera, acrescido de uma unidade de modo a evitar coeficientes nulos ($1 - w l_c / [1 + \max_{c \in C}(w l_c)]$). Assim, dá-se preferência à marcação dos pacientes pela ordem inversa de entrada na lista de espera.

Na HC1, consideram-se apenas os coeficientes referidos, mas, na HC2, esses coeficientes são divididos pela duração estimada da cirurgia, de modo a favorecer a marcação de mais cirurgias. Na Tabela 4.1, pode observar-se o coeficiente considerado para cada cirurgia c ($P_c^{i,k}$), dependendo da heurística construtiva. O índice i diz respeito à versão da heurística (1 ou 2) e o índice k à versão do problema (VA, VC-TM, VC-TT, VM-TM ou VM-TT).

Tabela 4.1. Coeficiente considerado para a cirurgia c na heurística i para a versão k : $P_c^{i,k}$

	Heurística Construtiva	
	1	2
VA + VM-TM	$p_c w_c$	$\frac{p_c w_c}{t_c^{TOT}}$
VC-TM	$2 \max_{c \in C}(w l_c) - w l_c + (D + 2)$	$\frac{2 \max_{c \in C}(w l_c) - w l_c + (D + 2)}{t_c^{TOT}}$
VC-TT + VM-TT	$1 - \frac{w l_c}{1 + \max_{c \in C}(w l_c)}$	$\frac{1 - w l_c / [1 + \max_{c \in C}(w l_c)]}{t_c^{TOT}}$

As heurísticas construtivas, associadas a cada versão, estão definidas em pseudo-código no Algoritmo 4.1. Este algoritmo pode ser executado para todas as especialidades cirúrgicas, de forma

¹ Note-se que apenas as cirurgias de prioridade 4 com a data limite durante o horizonte de planeamento são obrigatoriamente agendadas. As cirurgias com prioridade 4 que estejam fora de prazo podem ou não ser agendadas dependendo da otimização realizada em cada versão do problema.

integrada, ou para determinadas especialidades específicas, sendo apenas necessário colocar nos conjuntos C_d^P e C^{NP} as cirurgias em lista de espera, associadas a cada especialidade. Posteriormente, pelas condições do algoritmo, será garantido que as cirurgias serão marcadas em salas do bloco operatório associadas à sua especialidade cirúrgica.

Para marcar uma cirurgia, num determinado bloco de tempo, é necessário saber se este está disponível. Um bloco de tempo é considerado disponível se são satisfeitas as seguintes condições:

- O bloco de tempo está atribuído à especialidade da cirurgia que se pretende marcar;
- O bloco de tempo tem capacidade disponível para ser marcada a cirurgia, contabilizando o tempo total da cirurgia e o tempo de limpeza;
- O cirurgião responsável pela cirurgia não fica com sobreposições de tempo cirúrgico.

Para as versões VA, VC-TM e VM-TM, para além das condições anteriores, é ainda necessário garantir que, com a marcação da cirurgia, não é ultrapassado o limite diário e semanal de horas de trabalho, em cirurgia, do cirurgião responsável.

Caso alguma destas condições não seja verificada, o bloco de tempo não está disponível para essa cirurgia e, por isso, a cirurgia não pode ser marcada para este bloco de tempo. No caso do bloco de tempo estar disponível, a cirurgia é marcada, é atualizada a agenda cirúrgica semanal, são atualizados os parâmetros referentes à capacidade do bloco de tempo onde a cirurgia é marcada e à capacidade ainda disponível, diária e semanal, do cirurgião responsável. A cirurgia marcada é, então, retirada da lista de espera.

Pode ocorrer que as cirurgias urgentes diferidas, que necessitam de intervenção imediata à segunda-feira, não sejam marcadas. Nesse caso, foi criado um conjunto CN que representa as cirurgias com este nível de prioridade que, por não existirem blocos de tempo disponíveis à segunda-feira, não foram marcadas. Depois de executado o algoritmo, se $CN \neq \emptyset$, tem-se uma solução não admissível para o problema, uma vez que existem cirurgias urgentes diferidas que não foram marcadas. No entanto, com esta informação, as cirurgias pertencentes a CN podem, por exemplo, ser agendadas para a sala do bloco operatório que trata cirurgias urgentes e, apesar da solução não ser admissível, continua a obter-se uma agenda cirúrgica semanal que pode ser melhorada com as heurísticas de melhoria desenvolvidas.

Para cada solução do problema existe sempre um valor associado (*valor_sol*). O valor utilizado nas heurísticas é o valor da função objetivo dos modelos matemáticos, presentes na Secção 3.4. Assim, ao iniciar o algoritmo, independentemente da versão a considerar, o valor da solução é inicializado a 0. Quando uma cirurgia é marcada, é necessário adicionar ao valor da solução a ponderação associada a esta marcação, como ocorre com os modelos matemáticos quando $x_{cdb} = 1$. No final, quando se está perante uma versão em que a função objetivo contém uma ponderação por não marcar as cirurgias (quando $z_c = 1$ em VA, VC-TM e VM-TM), é necessário atualizar o valor da solução de modo a contabilizar, para cada cirurgia não marcada, a sua penalização.

4.3. Heurísticas de melhoramento

Após serem executadas as heurísticas construtivas, existe uma agenda cirúrgica semanal. Depois de existir uma agenda cirúrgica semanal, o objetivo é melhorá-la através de heurísticas de melhoramento.

As heurísticas de melhoramento baseiam-se na definição de vizinhanças. Uma solução é vizinha de outra quando difere dela apenas numa característica específica. Para o problema em estudo, foram criados 11 conceitos de vizinhança. Cada conceito baseia-se em um de quatro tipos de alteração à solução:

Algoritmo 4.1. Pseudo-código da HCl para a versão k

Input: Dados definidos na Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8.

Seja $P_c^{i,k}$ como definido na Tabela 4.1.

Output: Agenda Cirúrgica Semanal para a versão k e CN .

```
1: Inicializar  $valor\_sol = 0$  e  $CN = \emptyset$ .
2: for all  $c_1 \in C_d^P$  do
3:   if Existe um bloco de tempo disponível para marcar cirurgia  $c_1$  then
4:     Marcar cirurgia  $c_1$  para o primeiro bloco de tempo disponível à segunda-feira.
5:     Atualizar parâmetros e  $valor\_sol$ .
6:      $C_d^P \leftarrow C_d^P \setminus \{c_1\}$ .
7:   else
8:      $CN \leftarrow CN \cup \{c_1\}$ .
9:   end if
10: end for
11: for all  $c_2 \in C^{NP}$  do
12:   Calcular  $P_{c_2}^{i,k}$ .
13: end for
14: Ordenar  $C^{NP}$  por ordem decrescente de  $P_c^{i,k}$ .
15: for all  $c_2 \in C^{NP}$  do
16:   if Existe um bloco de tempo disponível para marcar cirurgia  $c_2$  then
17:     Marcar cirurgia  $c_2$  para o primeiro bloco de tempo disponível.
18:     Atualizar parâmetros e  $valor\_sol$ .
19:      $C^{NP} \leftarrow C^{NP} \setminus \{c_2\}$ .
20:   else
21:     Atualizar  $valor\_sol$ , se  $k \neq VC - TT$  e  $k \neq VM - TT$ .
22:   end if
23: end for
```

- a) Reposicionamento/troca de cirurgias de sala e/ou turno e/ou dia de forma a encontrar espaço para introduzir, na agenda cirúrgica, mais cirurgias em lista de espera;
- b) Adição de cirurgias presentes na lista de espera em espaços livres da agenda cirúrgica;
- c) Troca de cirurgias marcadas por cirurgias em lista de espera de forma a melhorar o valor da solução;
- d) Reposicionamento de cirurgias de forma a serem realizadas mais cirurgias no início da semana.

As quatro primeiras vizinhanças dizem respeito ao reposicionamento/troca de cirurgias de blocos de tempo (tipo a), de forma a encontrar espaço para a introdução de mais cirurgias em lista de espera (quinta vizinhança, tipo b). As quatro vizinhanças seguintes são trocas de cirurgias marcadas por cirurgias em lista de espera (tipo c), de forma a melhorar o valor da solução. Por último, são executadas duas vizinhanças que alteram a agenda cirúrgica semanal já definida, de forma a serem realizadas mais cirurgias no início da semana (tipo d). Estas duas últimas vizinhanças são apenas executadas para as versões do problema em que, para a função objetivo, é benéfico a marcação de mais cirurgias no início da semana (VA, VC-TM e VM-TM).

Para as 11 vizinhanças criadas, partindo da agenda cirúrgica encontrada pela heurística construtiva e pesquisando numa sua vizinhança, quando é encontrada uma melhor solução, esta substitui a anterior, e a vizinhança é executada de novo, partindo da nova solução do problema. Note-se que uma melhor solução pode ser uma solução com um melhor valor associado ou uma solução com valor igual, mas que apresente uma melhor distribuição dos tempos livres pelos blocos de tempo.

Em todas as vizinhanças, quando ocorre uma alteração de cirurgias de blocos é sempre garantido que essa alteração é realizada para blocos de tempo afetos à especialidade clínica das cirurgias

alteradas, para que as cirurgias marcadas para um bloco de tempo sejam sempre da especialidade afeta a este mesmo bloco.

4.3.1. Reposicionar/trocar cirurgias entre salas e/ou turnos e/ou dias

A primeira vizinhança, para especialidades que estão associadas a mais que um bloco de tempo no mesmo dia, muda uma cirurgia marcada num bloco de tempo para outro bloco de tempo do mesmo dia, de modo a obter mais tempo livre numa das salas, isto é:

$$\mathcal{V}^1(a_0) = \{a: a \text{ é uma agenda cirúrgica semanal que difere de } a_0 \text{ em uma cirurgia marcada para um bloco de tempo diferente no mesmo dia}\}$$

Na Figura 4.1, pode observar-se um exemplo de um reposicionamento de uma cirurgia que esta vizinhança proporciona. Neste exemplo, para o turno da tarde de um determinado dia, existem 3 cirurgias marcadas para a sala 10 e 3 cirurgias marcadas para a sala 11. Contabilizando o tempo de duração das cirurgias e o tempo de limpeza associado (30 minutos), a sala 10 e a sala 11 têm 20 e 50 minutos disponíveis, respetivamente. Com esta capacidade disponível pode não ser possível adicionar cirurgias da lista de espera, mas mudando a cirurgia c_3 para a sala 11, esta sala fica sem tempo disponível para marcação de cirurgias, e a sala 10 fica com mais tempo disponível, aumentando a possibilidade de marcação de mais cirurgias.

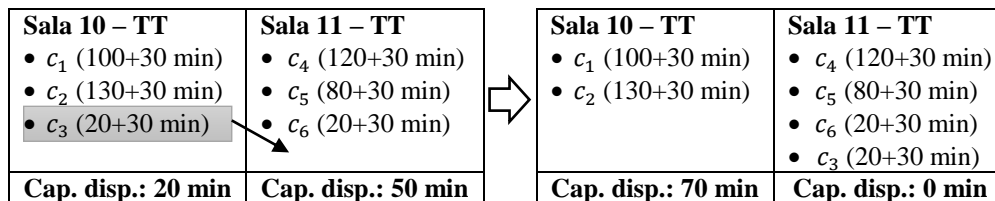


Figura 4.1. Exemplo de reposicionamento de uma cirurgia entre salas, no mesmo turno e no mesmo dia

No Algoritmo 4.2, está apresentado o pseudo-código da primeira vizinhança. Nesta vizinhança, o valor da solução não se altera, independentemente da versão do problema que seja considerada, uma vez que as cirurgias marcadas são as mesmas, e só ocorre uma alteração de sala e/ou de turno, num determinado dia com o objetivo de aumentar o maior tempo disponível.

Para ocorrer a mudança de sala, num determinado dia, é necessário verificar se é possível mudar a cirurgia, isto é, se é satisfeita a seguinte condição:

- O bloco de tempo, para onde se pretende mudar a cirurgia, é da mesma especialidade e tem capacidade disponível para ser marcada a cirurgia, contabilizando o tempo total da cirurgia e o tempo de limpeza.

Para a VA, onde o agendamento é feito de forma integrada para os turnos da manhã e para os turnos da tarde, pode acontecer que a marcação da cirurgia mude de turno. Nesse caso, para além da condição anterior, é necessário garantir que o cirurgião responsável pela cirurgia não fica com uma sobreposição de tempo cirúrgico, no turno correspondente ao bloco de tempo para o qual se pretende fazer a mudança.

Como esta vizinhança mantém as cirurgias marcadas nos mesmos dias, a capacidade disponível diária e semanal dos cirurgiões mantém-se igual, sendo o valor do parâmetro associado às capacidades dos blocos intervenientes o único a ser alterado.

Input: Dados definidos na Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8. Agenda Cirúrgica Semanal.

Output: Nova Agenda Cirúrgica Semanal.

```

1:  for all  $s \in S$  do
2:    mudousol  $\leftarrow$  1.
3:    while mudousol = 1 do
4:      mudousol  $\leftarrow$  0.
5:      for all  $d \in D, b \in B_d$  tal que  $a_{db}^s = 1$  e  $k_{db}^B \neq 0$  do
6:        for all cirurgia  $c$  marcada no bloco  $b$  do
7:          Escolher outro bloco de tempo  $b'$  no dia  $d$  tal que  $a_{db'}^s = 1$ 
8:          if É possível mudar cirurgia  $c$  para o bloco  $b'$  & Aumenta o maior tempo disponível then
9:            Desmarcar cirurgia  $c$  do bloco  $b$  e agendá-la no bloco  $b'$ .
10:           Atualizar parâmetro.
11:           mudousol  $\leftarrow$  1.
12:           Sair do ciclo for.
13:         end if
14:       end for
15:       if mudousol = 1 then
16:         Sair do ciclo for.
17:       end if
18:     end for
19:   end while
20: end for

```

A segunda vizinhança, tal como a primeira, é apenas executada para especialidades que, no mesmo dia, estão afetas a mais do que um bloco de tempo. Nesta vizinhança, ocorre uma troca entre duas cirurgias marcadas no mesmo dia, em blocos de tempo diferentes, de modo a obter mais tempo livre numa das salas, isto é:

$$\mathcal{V}^2(a_0) = \{ a : a \text{ é uma agenda cirúrgica semanal que difere de } a_0 \text{ na troca entre duas cirurgias marcadas em blocos de tempo diferentes no mesmo dia} \}$$

Na Figura 4.2, pode observar-se um exemplo de uma troca entre duas cirurgias, de acordo com esta estrutura de vizinhança. Neste exemplo, para o turno da tarde de um determinado dia, existem 3 cirurgias marcadas para a sala 10 e 3 cirurgias marcadas para a sala 11. Contabilizando o tempo de duração das cirurgias e o tempo de limpeza associado (30 minutos), a sala 10 e a sala 11 têm 20 e 50 minutos disponíveis, respetivamente. Estas capacidades disponíveis dificultam a marcação de outras cirurgias da lista de espera, mas trocando a cirurgia c_1 , marcada na sala 10, com a cirurgia c_4 , marcada na sala 11, a sala 10 fica sem tempo disponível para marcação de cirurgias e a sala 11 fica com mais tempo disponível para a marcação de mais cirurgias.

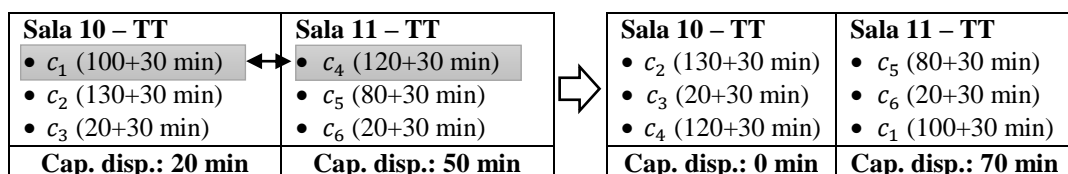


Figura 4.2. Exemplo de uma troca entre duas cirurgias de blocos diferentes, no mesmo turno e no mesmo dia

No Algoritmo 4.3, está apresentado o pseudo-código desta vizinhança e, assim como na vizinhança anterior, o valor da solução não é alterado e o objetivo é aumentar o maior tempo disponível nos blocos de tempo considerados. Para ocorrer esta troca entre duas cirurgias, é necessário verificar se é satisfeita a seguinte condição:

- Os dois blocos de tempo envolvidos na troca das duas cirurgias são da mesma especialidade e têm capacidade disponível para possibilitar a troca.

Assim como na vizinhança anterior, para a VA, se os dois blocos intervenientes forem de turnos diferentes, é necessário garantir que os cirurgiões responsáveis pelas cirurgias não ficam com uma sobreposição de tempo cirúrgico nos turnos correspondentes ao bloco de tempo para o qual se pretende fazer a troca. Neste caso, como as trocas envolvem apenas um dia, o único parâmetro cujo valor pode ser alterado é a capacidade disponível dos blocos.

Algoritmo 4.3. Pseudo-código da \mathcal{V}^2

Input: Dados definidos na Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8. Agenda Cirúrgica Semanal.

Output: Nova Agenda Cirúrgica Semanal.

```

1:  for all  $s \in S$  do
2:    mudousol  $\leftarrow$  1.
3:    while mudousol = 1 do
4:      mudousol  $\leftarrow$  0.
5:      for all  $d \in D, b \in B_d$  tal que  $a_{db}^S = 1$  e  $k_{db}^B \neq 0$  do
6:        for all  $b' \in B_d$  tal que  $b \neq b'$  e  $a_{db'}^S = 1$  do
7:          Escolher cirurgia  $c_1$  marcada para o bloco  $b$ .
8:          Escolher cirurgia  $c_2$  marcada para o bloco  $b'$ .
9:          if É possível trocar cirurgia  $c_1$  com a cirurgia  $c_2$  & Aumenta o maior tempo disponível then
10:            Desmarcar cirurgia  $c_1$  do bloco  $b$  e agendá-la no bloco  $b'$ 
11:            Desmarcar cirurgia  $c_2$  do bloco  $b'$  e agendá-la no bloco  $b$ .
12:            Atualizar parâmetro.
13:            mudousol  $\leftarrow$  1.
14:            Sair do ciclo for.
15:          end if
16:        end for
17:      if mudousol = 1 then
18:        Sair do ciclo for.
19:      end if
20:    end for
21:  end while
22: end for

```

A terceira vizinhança muda uma cirurgia marcada num bloco de tempo para outro bloco de tempo de outro dia, de modo a obter mais tempo livre numa das salas, isto é:

$$\mathcal{V}^3(a_0) = \{a: a \text{ é uma agenda cirúrgica semanal que difere de } a_0 \text{ em apenas uma cirurgia marcada para um bloco de tempo num dia diferente}\}$$

Esta mudança é similar à mudança que ocorre na primeira vizinhança, exemplificada na Figura 4.1. A única diferença é que os blocos de tempo envolvidos são de dias diferentes, ou seja, a marcação da cirurgia é alterada para outro dia, sendo necessário satisfazer mais condições do que as verificadas anteriormente.

No Algoritmo 4.4, está apresentado o pseudo-código da terceira vizinhança. Nesta vizinhança, o valor da solução pode ser alterado quando se trata das versões VA, VC-TM e VM-TM, uma vez que estas têm em conta, na função objetivo, o dia da semana em que são realizadas as cirurgias. Assim, nestas três versões, o valor da solução pode aumentar ou reduzir com o objetivo de aumentar o maior tempo disponível num dos blocos de tempo. Nas versões VC-TT e VM-TT, quando a solução é alterada, o seu valor mantém-se igual.

Para ocorrer a mudança de cirurgia para um bloco de tempo de outro dia, é necessário ter em conta que não se pode mudar uma cirurgia que esteja marcada para segunda-feira e que seja urgente diferida com a data limite naquele dia. Caso a cirurgia considerada não verifique esta situação, é necessário verificar se é possível mudar a cirurgia, isto é, se são satisfeitas as seguintes condições:

- O bloco de tempo é da mesma especialidade e tem capacidade disponível para ser marcada a cirurgia, contabilizando o tempo total da cirurgia e o tempo de limpeza;
- O cirurgião responsável pela cirurgia não fica com sobreposição de tempo cirúrgico.

Para as versões VA, VC-TM e VM-TM, para além das condições anteriores, é ainda necessário garantir que, com a alteração do dia de agendamento da cirurgia, não seja ultrapassado o limite diário de horas de trabalho, em cirurgia, do cirurgião responsável.

Quando ocorre uma alteração do dia de agendamento de uma cirurgia, é necessário atualizar o valor do parâmetro referente à capacidade dos dois blocos envolvidos, bem como o valor do parâmetro referente às horas em cirurgia, do cirurgião responsável, nos dois dias considerados.

Algoritmo 4.4. Pseudo-código da \mathcal{V}^3

Input: Dados definidos na Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8. Agenda Cirúrgica Semanal.

Output: Nova Agenda Cirúrgica Semanal.

```

1:  for all  $s \in S$  do
2:      mudousol  $\leftarrow$  1.
3:      while mudousol = 1 do
4:          mudousol  $\leftarrow$  0.
5:          for all  $d \in D, b \in B_d$  tal que  $a_{db}^S = 1$  e  $k_{db}^B \neq 0$  do
6:              for all cirurgia  $c$  marcada no bloco  $b$  do
7:                  Escolher  $d' \in D$  e  $b' \in B_{d'}$  tal que  $d' \neq d$  e  $a_{d'b'}^S = 1$ 
8:                  if É possível mudar cirurgia  $c$  para o dia  $d'$  no bloco  $b'$  & Aumenta o maior tempo
                    disponível then
9:                      Desmarcar cirurgia  $c$  do dia  $d$  e agendá-la no bloco  $b'$  do dia  $d'$ .
10:                     Atualizar parâmetros e valor da solução.
11:                     mudousol  $\leftarrow$  1.
12:                     Sair do ciclo for.
13:                 end if
14:             end for
15:             if mudousol = 1 then
16:                 Sair do ciclo for.
17:             end if
18:         end for
19:     end while
20: end for

```

A quarta vizinhança promove trocas entre duas cirurgias marcadas para dias diferentes, de modo a obter mais tempo livre numa das salas, isto é:

$$\mathcal{V}^4(a_0) = \{ a : a \text{ é uma agenda cirúrgica semanal que difere de } a_0 \text{ na troca de uma cirurgia marcada para um bloco de tempo, num dia, com uma cirurgia marcada para um bloco de tempo, noutro dia} \}$$

Esta troca é similar à troca que ocorre na segunda vizinhança, exemplificada na Figura 4.2. A única diferença é que as duas cirurgias envolvidas estão marcadas para dias diferentes, levando a que seja necessário satisfazer mais condições para possibilitar a troca.

No Algoritmo 4.5, está apresentado o pseudo-código desta vizinhança. Uma vez que esta troca mantém, para o mesmo dia, o mesmo número de cirurgias marcadas e apenas promove uma troca de duas cirurgias marcadas para dias diferentes, então o valor da solução não é alterado, para todas as versões a considerar e o objetivo é aumentar o maior tempo disponível num dos blocos de tempo..

Para ocorrer esta troca, é necessário verificar se as duas cirurgias selecionadas não são urgentes diferidas, com data limite no dia considerado, e se são satisfeitas as seguintes condições:

- Os dois blocos de tempo envolvidos na troca das duas cirurgias são da mesma especialidade e têm capacidade disponível para suportar a troca;
- Os cirurgiões que irão realizar as cirurgias não ficam com sobreposições de tempo cirúrgico.

Para as versões VA, VC-TM e VM-TM, para além das condições anteriores, é ainda necessário garantir que, com a troca das duas cirurgias, não é ultrapassado o limite diário de horas de trabalho em cirurgia dos cirurgiões responsáveis.

Quando ocorre uma troca entre duas cirurgias marcadas para dias diferentes, é necessário atualizar o valor do parâmetro referente à capacidade dos dois blocos envolvidos, bem como os parâmetros referentes às horas em cirurgia dos cirurgiões responsáveis, nos dois dias considerados.

Algoritmo 4.5. Pseudo-código da \mathcal{V}^4

Input: Dados definidos na Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8. Agenda Cirúrgica Semanal.

Output: Nova Agenda Cirúrgica Semanal.

```

1:  for all  $s \in S$  do
2:    mudousol  $\leftarrow$  1.
3:    while mudousol = 1 do
4:      mudousol  $\leftarrow$  0.
5:      for all  $d \in D, b \in B_d$  tal que  $a_{db}^S = 1$  e  $k_{db}^B \neq 0$  do
6:        for all  $d' \in D, b' \in B_{d'}$  tal que  $d \neq d'$  e  $a_{d'b'}^S = 1$  do
7:          Escolher cirurgia  $c_1$  marcada para o bloco  $b$  no dia  $d$ .
8:          Escolher cirurgia  $c_2$  marcada para o bloco  $b'$  no dia  $d'$ .
9:          if É possível trocar cirurgia  $c_1$  com a cirurgia  $c_2$  & Aumenta o maior tempo disponível then
10:             Desmarcar cirurgia  $c_1$  do bloco  $b$  e agendá-la no bloco  $b'$ .
11:             Desmarcar cirurgia  $c_2$  do bloco  $b'$  e agendá-la no bloco  $b$ .
12:             Atualizar parâmetros.
13:             mudousol  $\leftarrow$  1.
14:             Sair do ciclo for.
15:           end if
16:         end for
17:       if mudousol = 1 then
18:         Sair do ciclo for.
19:       end if
20:     end for
21:   end while
22: end for

```

4.3.2. Acrescentar cirurgias

A quinta vizinhança acrescenta à agenda cirúrgica semanal, no tempo livre criado com as vizinhanças anteriores, cirurgias que estão em lista de espera, isto é:

$$\mathcal{V}^5(a_0) = \{ a : a \text{ é uma agenda cirúrgica semanal que difere de } a_0 \text{ em mais uma cirurgia marcada} \}$$

No Algoritmo 4.6, está apresentado o pseudo-código desta vizinhança e, como esta vizinhança possibilita acrescentar cirurgias à agenda cirúrgica semanal, o valor associado à solução pode melhorar, isto é, diminuir para as versões VA, VC-TM e VM-TM e aumentar para as versões VC-TT e VM-TT.

Para ser acrescentada uma cirurgia à agenda cirúrgica, é necessário verificar se, ao marcar uma cirurgia para um bloco de tempo, são satisfeitas as seguintes condições:

- O bloco de tempo está associado à especialidade da cirurgia que se pretende marcar;
- O bloco de tempo tem capacidade disponível para ser marcada a cirurgia, contabilizando o tempo total da cirurgia e o tempo de limpeza;
- O cirurgião responsável pela cirurgia não fica com sobreposição de tempo cirúrgico.

Para as versões VA, VC-TM e VM-TM, para além das condições anteriores, é ainda necessário garantir que, com a marcação da cirurgia, não é ultrapassado o limite diário e semanal de horas de trabalho, em cirurgia, do cirurgião responsável.

Caso uma cirurgia seja marcada, para além de ser atualizada a agenda cirúrgica semanal e a cirurgia marcada ser retirada da lista de espera, é necessário atualizar os valores dos parâmetros do problema referentes à capacidade do bloco de tempo onde é marcada a cirurgia e às horas em cirurgia, diárias e semanais, do cirurgião responsável pela cirurgia marcada.

Algoritmo 4.6. Pseudo-código da \mathcal{V}^5

Input: Dados definidos na Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8. Agenda Cirúrgica Semanal.

Output: Nova Agenda Cirúrgica Semanal.

```

1:  for all  $c \in C^{NP}$  do
2:      if Existe um bloco de tempo disponível para marcar cirurgia  $c$  then
3:          Marcar cirurgia  $c$  para o primeiro bloco de tempo disponível.
4:          Atualizar parâmetros e valor da solução.
5:           $C^{NP} \leftarrow C^{NP} \setminus \{c\}$ .
6:      end if
7:  end for

```

4.3.3. Trocar cirurgias marcadas por cirurgias em lista de espera

As quatro vizinhanças seguintes promovem trocas que conduzem necessariamente a uma solução melhor, logo, independentemente da versão do problema considerada, o valor associado a uma nova solução será sempre melhor. Nestas vizinhanças, quando ocorre uma troca, é necessário atualizar a agenda cirúrgica semanal e os valores dos parâmetros do problema referentes à capacidade do bloco de tempo envolvido e às horas em cirurgia, diárias e semanais, dos cirurgiões responsáveis pelas cirurgias marcadas.

A sexta vizinhança troca uma cirurgia marcada por uma cirurgia em lista de espera da mesma especialidade se a solução melhorar, ou seja, desmarca uma cirurgia e escolhe, da lista de espera, uma cirurgia a ser marcada para o mesmo bloco de tempo da cirurgia que foi desmarcada, isto é:

$$\mathcal{V}^6(a_0) = \{ a : a \text{ é uma agenda cirúrgica semanal que difere de } a_0 \text{ na troca de uma cirurgia marcada por uma cirurgia em lista de espera} \}$$

No Algoritmo 4.7, está apresentado o pseudo-código desta vizinhança e, para ocorrer esta troca, é necessário verificar se a cirurgia que é desmarcada é uma cirurgia que não é urgente diferida com data limite naquele dia, e se são satisfeitas as seguintes condições:

- O bloco de tempo tem capacidade disponível para ser marcada a cirurgia, contabilizando o tempo total da cirurgia e o tempo de limpeza, retirando o tempo total da cirurgia desmarcada e o respetivo tempo de limpeza;
- O cirurgião responsável pela cirurgia que se pretende marcar não fica com sobreposição de tempo cirúrgico.

Para as versões VA, VC-TM e VM-TM, para além das condições anteriores, é ainda necessário garantir que, com a marcação da cirurgia, não é ultrapassado o limite diário e semanal de horas de trabalho, em cirurgia, do cirurgião responsável pela cirurgia.

Algoritmo 4.7. Pseudo-código da \mathcal{V}^6

Input: Dados definidos na Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8. Agenda Cirúrgica Semanal.

Output: Nova Agenda Cirúrgica Semanal.

```

1:  for all  $s \in S$  do
2:      mudousol  $\leftarrow$  1.
3:      while mudousol = 1 do
4:          mudousol  $\leftarrow$  0.
5:          for all  $d \in D, b \in B_d$  tal que  $a_{db}^s = 1$  do
6:              Escolher cirurgia  $c_1$  marcada para o bloco  $b$  que não seja urgente diferida.
7:              for all  $c_2 \in C^{NP}$  do
8:                  if É possível trocar cirurgia  $c_1$  com  $c_2$  & A troca melhora a solução then
9:                      Desmarcar cirurgia  $c_1$  do bloco  $b$  no dia  $d$ .  $C^{NP} \leftarrow C^{NP} \cup \{c_1\}$ .
10:                     Marcar cirurgia  $c_2$  no bloco  $b$  no dia  $d$ .  $C^{NP} \leftarrow C^{NP} \setminus \{c_2\}$ .
11:                     Atualizar parâmetros e valor da solução.
12:                     mudousol  $\leftarrow$  1.
13:                     Sair do ciclo for.
14:                 end if
15:             end for
16:             if mudousol = 1 then
17:                 Sair do ciclo for.
18:             end if
19:         end for
20:     end while
21: end for

```

Na Figura 4.3, pode observar-se um exemplo de uma troca de uma cirurgia marcada por uma cirurgia em lista de espera para a VA. Cada cirurgia tem dois coeficientes associados (a , b) onde a é o coeficiente associado à marcação e b é o coeficiente considerado pela não marcação da cirurgia, de acordo com a função objetivo da VA.

Neste exemplo, a cirurgia c_3 , marcada para o turno da manhã de terça-feira na sala 1, é trocada pela cirurgia c_4 , em lista de espera. Esta troca só ocorre se o valor da solução melhorar e se são satisfeitas todas as condições atrás enunciadas. Com esta troca, o número de cirurgias marcadas e o número de cirurgias em lista de espera mantém-se igual, mas, do ponto de vista do objetivo do problema, as cirurgias marcadas na nova solução melhoram os critérios do problema comparativamente às marcadas anteriormente, sendo, por isso, melhor o valor da nova solução.

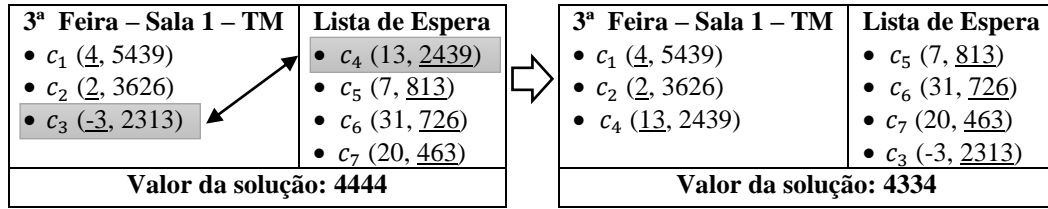


Figura 4.3. Exemplo de uma troca de uma cirurgia marcada por uma cirurgia em lista de espera, para a VA

A sétima vizinhança troca uma cirurgia marcada por duas cirurgias em lista de espera, se a solução melhorar, ou seja, desmarca uma cirurgia e escolhe, da lista de espera, duas cirurgias da mesma especialidade a serem marcadas para o mesmo bloco de tempo da cirurgia desmarcada, isto é:

$\mathcal{V}^7(a_0) = \{ a : a \text{ é uma agenda cirúrgica semanal que difere de } a_0 \text{ na troca de uma cirurgia marcada por duas cirurgias em lista de espera} \}$

No Algoritmo 4.8, está apresentado o pseudo-código desta vizinhança e, para ocorrer esta troca, é necessário verificar se a cirurgia que é desmarcada é uma cirurgia que não é urgente diferida, com data limite naquele dia, e se são satisfeitas as seguintes condições:

- O bloco de tempo tem capacidade disponível para serem marcadas as duas cirurgias, contabilizando os tempos totais das cirurgias e os respectivos tempos de limpeza, retirando o tempo total da cirurgia desmarcada e o seu tempo de limpeza;
- Os cirurgiões responsáveis pelas cirurgias não ficam com sobreposição de tempo cirúrgico.

Para as versões VA, VC-TM e VM-TM, para além das condições anteriores, é ainda necessário garantir que, com a marcação das cirurgias, não é ultrapassado o limite diário e semanal de horas de trabalho, em cirurgia, dos cirurgiões responsáveis.

Algoritmo 4.8. Pseudo-código da \mathcal{V}^7

Input: Dados definidos na Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8. Agenda Cirúrgica Semanal.

Output: Nova Agenda Cirúrgica Semanal.

```

1:  for all  $s \in S$  do
2:    mudousol  $\leftarrow$  1.
3:    while mudousol = 1 do
4:      mudousol  $\leftarrow$  0.
5:      for all  $d \in D, b \in B_d$  tal que  $a_{db}^s = 1$  do
6:        Escolher cirurgia  $c_1$ , marcada para o bloco  $b$ , que não seja urgente diferida.
7:        for all  $c_2, c_3 \in C^{NP}$  do
8:          if É possível trocar cirurgia  $c_1$  com  $c_2$  e  $c_3$  & Troca melhora a solução then
9:            Desmarcar cirurgia  $c_1$  do bloco  $b$  no dia  $d$ .  $C^{NP} \leftarrow C^{NP} \cup \{c_1\}$ .
10:           Marcar cirurgias  $c_2$  e  $c_3$  no bloco  $b$  no dia  $d$ .  $C^{NP} \leftarrow C^{NP} \setminus \{c_2, c_3\}$ .
11:           Atualizar parâmetros e valor da solução.
12:           mudousol  $\leftarrow$  1.
13:           Sair do ciclo for.
14:         end if
15:       end for
16:       if mudousol = 1 then
17:         Sair do ciclo for.
18:       end if
19:     end for
20:   end while
21: end for

```

Na Figura 4.4, pode observar-se um exemplo de uma troca de uma cirurgia marcada por duas cirurgias em lista de espera para a VA. Cada cirurgia tem dois coeficientes associados (a , b) onde a é o coeficiente associado à marcação e b é o coeficiente considerado pela não marcação, de acordo com a função objetivo da VA.

Neste exemplo, a cirurgia c_2 , marcada para o turno da manhã de terça-feira na sala 1, é trocada pelas cirurgias c_5 e c_6 , em lista de espera. Esta troca só ocorre se o valor da solução melhorar e se são satisfeitas todas as condições atrás enunciadas.

3ª Feira - Sala 1 – TM	Lista de Espera	⇨	3ª Feira - Sala 1 – TM	Lista de Espera
<ul style="list-style-type: none"> • c_1 (4, 5439) • c_2 (2, 3626) • c_3 (13, 2439) 	<ul style="list-style-type: none"> • c_4 (14, 2439) • c_5 (-3, 2313) • c_6 (6, 1813) • c_7 (31, 726) 		<ul style="list-style-type: none"> • c_1 (4, 5439) • c_3 (13, 2439) • c_5 (-3, 2313) • c_6 (6, 1813) 	<ul style="list-style-type: none"> • c_4 (14, 2439) • c_7 (31, 726) • c_2 (2, 3626)
Valor da solução: 7310			Valor da solução: 6811	

Figura 4.4. Exemplo de uma troca de uma cirurgia marcada por duas cirurgias em lista de espera, para a VA

A oitava vizinhança troca duas cirurgias marcadas, no mesmo bloco de tempo, por uma cirurgia em lista de espera, se a solução melhorar, ou seja, desmarca duas cirurgias que estejam marcadas no mesmo bloco de tempo e escolhe, da lista de espera, uma cirurgia da mesma especialidade a ser marcada para o mesmo bloco de tempo das cirurgias que foram desmarcadas, isto é:

$$\mathcal{V}^8(a_0) = \{ a: a \text{ é uma agenda cirúrgica semanal que difere de } a_0 \text{ na troca de duas cirurgias marcadas por uma cirurgia em lista de espera} \}$$

No Algoritmo 4.9, está apresentado o pseudo-código desta vizinhança e, para ocorrer esta troca, é necessário verificar se as cirurgias que são desmarcadas não são urgentes diferidas, com data limite no dia considerado, e se são satisfeitas as seguintes condições:

- O bloco de tempo tem capacidade disponível para ser marcada a cirurgia, contabilizando o tempo total da cirurgia e o tempo de limpeza, retirando o tempo total das cirurgias desmarcadas e os respetivos tempos de limpeza;
- O cirurgião responsável pela cirurgia que se pretende marcar não fica com sobreposição de tempo cirúrgico.

Para as versões VA, VC-TM e VM-TM, para além das condições anteriores, é ainda necessário garantir que, com a marcação da cirurgia, não é ultrapassado o limite diário e semanal de horas de trabalho, em cirurgia, do cirurgião responsável pela cirurgia.

Na Figura 4.5, pode observar-se um exemplo de uma troca que esta vizinhança proporciona para a VA. Cada cirurgia tem dois coeficientes associados (a , b) onde a é o coeficiente associado à marcação e b é o coeficiente considerado pela não marcação, de acordo com a função objetivo da VA. Esta troca diminui o número de cirurgias agendadas, ao contrário da troca proposta pela vizinhança anterior.

Neste exemplo, as cirurgias c_2 e c_3 , marcadas para o turno da manhã de terça-feira na sala 1, são trocadas pela cirurgia c_6 , em lista de espera. Esta troca só ocorre se o valor da solução melhorar e se são satisfeitas todas as condições atrás enunciadas.

3ª Feira - Sala 1 – TM	Lista de Espera	⇨	3ª Feira - Sala 1 – TM	Lista de Espera
<ul style="list-style-type: none"> • c_1 (13, 2439) • c_2 (16, 463) • c_3 (40, 363) 	<ul style="list-style-type: none"> • c_4 (-3, 2313) • c_5 (20, 1626) • c_6 (7, 813) • c_7 (31, 726) 		<ul style="list-style-type: none"> • c_1 (13, 2439) • c_6 (7, 813) 	<ul style="list-style-type: none"> • c_4 (-3, 2313) • c_5 (20, 1626) • c_7 (31, 726) • c_2 (16, 463) • c_3 (40, 363)
Valor da solução: 5547			Valor da solução: 5511	

Figura 4.5. Exemplo de uma troca de duas cirurgias marcadas por uma cirurgia em lista de espera, para a VA

Input: Dados definidos na Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8. Agenda Cirúrgica Semanal.

Output: Nova Agenda Cirúrgica Semanal.

```

1:  for all  $s \in S$  do
2:    mudousol  $\leftarrow$  1.
3:    while mudousol = 1 do
4:      mudousol  $\leftarrow$  0.
5:      for all  $d \in D, b \in B_d$  tal que  $a_{db}^s = 1$  do
6:        Escolher cirurgias  $c_1$  e  $c_2$  marcadas para o bloco  $b$  que não sejam cirurgias
        urgentes diferidas.
7:        for all  $c_3 \in C^{NP}$  do
8:          if É possível trocar cirurgia  $c_1$  e  $c_2$  com  $c_3$  & A troca melhora a solução then
9:            Desmarcar cirurgias  $c_1$  e  $c_2$  do bloco  $b$  no dia  $d$ .  $C^{NP} \leftarrow C^{NP} \cup \{c_1, c_2\}$ .
10:           Marcar cirurgia  $c_3$  no bloco  $b$  no dia  $d$ .  $C^{NP} \leftarrow C^{NP} \setminus \{c_3\}$ .
11:           Atualizar parâmetros e valor da solução.
12:           mudousol  $\leftarrow$  1.
13:           Sair do ciclo for.
14:         end if
15:       end for
16:       if mudousol = 1 then
17:         Sair do ciclo for.
18:       end if
19:     end for
20:   end while
21: end for

```

A nona vizinhança troca duas cirurgias marcadas, no mesmo bloco de tempo, por duas cirurgias em lista de espera, se a solução melhorar, ou seja, desmarca duas cirurgias e escolhe, da lista de espera, duas cirurgias da mesma especialidade, a serem marcadas para o mesmo bloco de tempo das cirurgias que foram desmarcadas, isto é:

$$\mathcal{V}^9(a_0) = \{ a : a \text{ é uma agenda cirúrgica semanal que difere de } a_0 \text{ na troca de duas cirurgias marcadas por duas cirurgias em lista de espera} \}$$

No Algoritmo 4.10, está apresentado o pseudo-código desta vizinhança e, para ocorrer esta troca, é necessário verificar se as cirurgias que são desmarcadas não são urgentes diferidas, com data limite naquele dia, e se são satisfeitas as seguintes condições:

- O bloco de tempo tem capacidade disponível para serem marcadas as duas cirurgias, contabilizando os tempos totais das cirurgias e os tempos de limpeza, retirando o tempo total das cirurgias desmarcadas e os seus tempos de limpeza;
- Os cirurgiões responsáveis pelas cirurgias que se pretendem marcar não ficam com sobreposições de tempo cirúrgico.

Para as versões VA, VC-TM e VM-TM, para além das condições anteriores, é ainda necessário garantir que, com a marcação das cirurgias, não é ultrapassado o limite diário e semanal de horas de trabalho, em cirurgia, dos cirurgiões responsáveis.

Na Figura 4.6, pode observar-se um exemplo desta troca. Cada cirurgia tem dois coeficientes associados (a, b) onde a é o coeficiente associado à marcação e b é o coeficiente considerado pela não marcação da cirurgia, de acordo com a função objetivo da VA. Esta troca, assim como a troca proporcionada pela sexta vizinhança, não altera o número de cirurgias marcadas.

Neste exemplo, as cirurgias c_2 e c_3 são trocadas pelas cirurgias c_5 e c_6 da lista de espera, se o valor da solução melhorar e se são satisfeitas todas as condições atrás enunciadas.

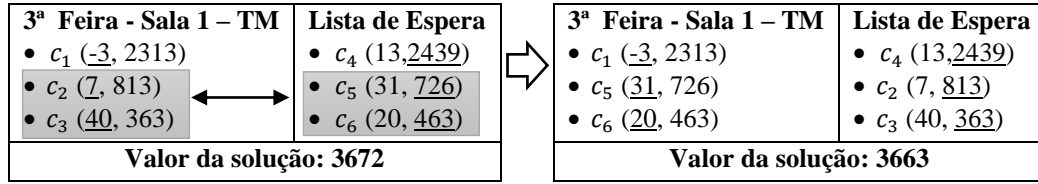


Figura 4.6. Exemplo de uma troca de duas cirurgias marcadas por duas cirurgias em lista de espera, para a VA

Algoritmo 4.10. Pseudo-código da \mathcal{V}^9

Input: Dados definidos na Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8. Agenda Cirúrgica Semanal.

Output: Nova Agenda Cirúrgica Semanal.

```

1:  for all  $s \in S$  do
2:      mudousol  $\leftarrow$  1.
3:      while mudousol = 1 do
4:          mudousol  $\leftarrow$  0.
5:          for all  $d \in D, b \in B_d$  tal que  $a_{db}^s = 1$  do
6:              Escolher cirurgias  $c_1$  e  $c_2$  marcadas para o bloco  $b$  que não sejam cirurgias urgentes diferidas.
7:              for all  $c_3, c_4 \in C^{NP}$  do
8:                  if É possível trocar cirurgias  $c_1$  e  $c_2$  com  $c_3$  e  $c_4$  & A troca melhora a solução then
9:                      Desmarcar cirurgias  $c_1$  e  $c_2$  do bloco  $b$  no dia  $d$ .  $C^{NP} \leftarrow C^{NP} \cup \{c_1, c_2\}$ .
10:                     Marcar cirurgias  $c_3$  e  $c_4$  no bloco  $b$  no dia  $d$ .  $C^{NP} \leftarrow C^{NP} \setminus \{c_3, c_4\}$ .
11:                     Atualizar parâmetros e valor da solução.
12:                     mudousol  $\leftarrow$  1.
13:                     Sair do ciclo for.
14:                 end if
15:             end for
16:             if mudousol = 1 then
17:                 Sair do ciclo for.
18:             end if
19:         end for
20:     end while
21: end for

```

4.3.4. Reposicionar cirurgias

As duas últimas vizinhanças apenas são realizadas para as versões VA, VC-TM e VM-TM pois permitem o reposicionamento de cirurgias de forma a serem realizadas mais cirurgias no início da semana. Nestas vizinhanças, o valor da solução é melhorado de acordo com o número de dias que as cirurgias são antecipadas.

A décima vizinhança muda uma cirurgia já marcada, para outro bloco de tempo de, pelo menos, um dia mais cedo no horizonte de planeamento, isto é:

$$\mathcal{V}^{10}(a_0) = \{ a : a \text{ é uma agenda cirúrgica semanal que difere de } a_0 \text{ em uma cirurgia antecipada no horizonte de planeamento} \}$$

No Algoritmo 4.11, está apresentado o pseudo-código da décima vizinhança. Para antecipar o dia da cirurgia, é necessário verificar se é possível mudar a cirurgia, isto é, se são satisfeitas as seguintes condições:

- O bloco de tempo é da mesma especialidade e tem capacidade disponível para ser marcada a cirurgia, contabilizando o tempo total da cirurgia e o tempo de limpeza;
- O cirurgião responsável pela cirurgia não fica com sobreposição de tempo cirúrgico;
- Não é ultrapassado o limite diário de horas de trabalho, em cirurgia, do cirurgião responsável pela cirurgia.

Quando é alterado o dia do agendamento da cirurgia, é necessário atualizar o valor do parâmetro referente à capacidade dos dois blocos envolvidos, bem como o parâmetro referente às horas, em cirurgia, do cirurgião responsável, nos dois dias considerados.

Esta vizinhança é similar à primeira vizinhança, exemplificada na Figura 4.1. A única diferença é que os blocos de tempo envolvidos são de dias diferentes e a cirurgia muda, obrigatoriamente, para um bloco de tempo de, pelo menos, um dia mais cedo.

Algoritmo 4.11. Pseudo-código da \mathcal{V}^{10}

Input: Dados definidos na Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8. Agenda Cirúrgica Semanal.

Output: Nova Agenda Cirúrgica Semanal.

```

1:  for all  $s \in S$  do
2:      mudousol  $\leftarrow$  1.
3:      while mudousol = 1 do
4:          mudousol  $\leftarrow$  0.
5:          Ordenar  $d \in D$  por ordem decrescente de forma a ser considerado primeiro os dias no final da
            semana
6:          for all  $d \in D, b \in B_d$  tal que  $a_{db}^s = 1$  e  $k_{db}^B \neq 0$  do
7:              for all cirurgia  $c$  marcada no bloco  $b$  do
8:                  Escolher  $d' \in D$  e  $b' \in B_{d'}$  tal que  $d' < d$  e  $a_{d'b'}^s = 1$ 
9:                  if É possível mudar cirurgia  $c$  para o dia  $d'$  no bloco  $b'$  & A troca melhora a solução then
10:                     Desmarcar cirurgia  $c$  do dia  $d$  e agendá-la no bloco  $b'$  no dia  $d'$ .
11:                     Atualizar parâmetros e valor da solução.
12:                     mudousol  $\leftarrow$  1.
13:                     Sair do ciclo for.
14:                 end if
15:             end for
16:         if mudousol = 1 then
17:             Sair do ciclo for.
18:         end if
19:     end for
20: end while
21: end for

```

A última vizinhança analisada troca uma cirurgia marcada num bloco de tempo no início do horizonte de planeamento, por duas cirurgias marcadas para outro bloco de tempo de, pelo menos, um dia mais tarde, no horizonte de planeamento, isto é:

$\mathcal{V}^{11}(a_0) = \{ a : a \text{ é uma agenda cirúrgica semanal que difere de } a_0 \text{ na troca de uma cirurgia marcada no início da semana por duas cirurgias marcadas no final da semana} \}$

No Algoritmo 4.12, está apresentado o pseudo-código da décima primeira vizinhança. Para ocorrer a troca entre uma cirurgia marcada para um bloco de tempo, no início do horizonte de planeamento, e duas cirurgias marcadas para um bloco de tempo, no final do horizonte de planeamento, é necessário verificar se é possível trocar as cirurgias, isto é, se são satisfeitas as seguintes condições:

- Os blocos de tempo envolvidos na troca são da mesma especialidade e têm capacidade disponível para suportar a troca das cirurgias, contabilizando os tempos totais das cirurgias e os tempos de limpeza;
- Os cirurgiões responsáveis pelas cirurgias não ficam com sobreposição de tempo cirúrgico;
- Não é ultrapassado o limite diário de horas de trabalho, em cirurgia, dos cirurgiões responsáveis pelas cirurgias envolvidas na troca.

Quando ocorre esta troca, é necessário atualizar o valor do parâmetro referente à capacidade dos dois blocos envolvidos, bem como o valor do parâmetro referente às horas em cirurgia dos cirurgiões responsáveis, nos dois dias considerados.

Algoritmo 4.12. Pseudo-código da \mathcal{V}^{11}

Input: Dados definidos na Tabela 3.6, Tabela 3.7 e Tabela 3.8. Agenda Cirúrgica Semanal.

Output: Nova Agenda Cirúrgica Semanal.

```

1:  for all  $s \in S$  do
2:      mudousol  $\leftarrow$  1.
3:      while mudousol = 1 do
4:          mudousol  $\leftarrow$  0.
5:          for all  $d \in D, b \in B_d$  tal que  $a_{db}^s = 1$  e  $k_{db}^B \neq 0$  do
6:              for all  $d' \in D, b' \in B_{d'}$  tal que  $d < d'$  e  $a_{d'b'}^s = 1$  do
7:                  Escolher cirurgia  $c_1$  marcada para o bloco  $b$  no dia  $d$ .
8:                  Escolher cirurgias  $c_2$  e  $c_3$  marcada para o bloco  $b'$  no dia  $d'$ .
9:                  if É possível trocar cirurgia  $c_1$  com as cirurgias  $c_2$  e  $c_3$  & A troca melhora a solução then
10:                     Desmarcar cirurgia  $c_1$  do bloco  $b$  e agendá-la no bloco  $b'$  no dia  $d'$ .
11:                     Desmarcar cirurgias  $c_2$  e  $c_3$  do bloco  $b'$  e agendá-las no bloco  $b$  no dia  $d$ .
12:                     Atualizar parâmetros e valor da solução.
13:                     mudousol  $\leftarrow$  1.
14:                     Sair do ciclo for.
15:                 end if
16:             end for
17:             if mudousol = 1 then
18:                 Sair do ciclo for.
19:             end if
20:         end for
21:     end while
22: end for

```

Na Figura 4.7, pode observar-se um exemplo de uma troca proposta por esta vizinhança. Cada cirurgia tem um coeficiente (a) associado à sua marcação, de acordo com a função objetivo da VA, que depende do dia da semana em que a cirurgia é marcada.

Neste exemplo, a cirurgia c_2 , marcada para terça-feira, é trocada pelas cirurgias c_4 e c_5 , marcadas para sexta-feira, supondo que as condições atrás descritas são garantidas.

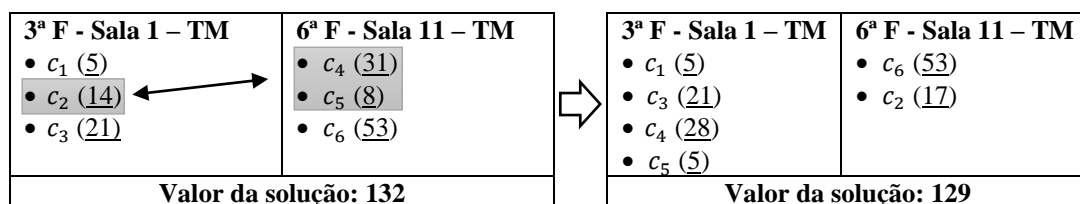


Figura 4.7. Exemplo de uma troca entre uma cirurgia marcada, no início da semana, e duas cirurgias marcadas, no final da semana, para a VA

De forma a sintetizar as vizinhanças desenvolvidas, na Tabela 4.2 podem observar-se as 11 vizinhanças propostas, com uma breve descrição.

Tabela 4.2. Resumo das vizinhanças propostas

\mathcal{V}^1	Reposicionamento de cirurgias marcadas para blocos de tempo no mesmo dia
\mathcal{V}^2	Trocas entre duas cirurgias marcadas em blocos de tempo diferentes no mesmo dia
\mathcal{V}^3	Reposicionamento de cirurgias marcadas para dias diferentes
\mathcal{V}^4	Trocas entre duas cirurgias marcadas em dias diferentes
\mathcal{V}^5	Marcação de cirurgias em lista de espera na agenda cirúrgica semanal
\mathcal{V}^6	Trocas entre uma cirurgia marcada e uma cirurgia em lista de espera
\mathcal{V}^7	Trocas entre uma cirurgia marcada e duas cirurgias em lista de espera
\mathcal{V}^8	Trocas entre duas cirurgias marcadas e uma cirurgia em lista de espera
\mathcal{V}^9	Trocas entre duas cirurgias marcadas e duas cirurgias em lista de espera
\mathcal{V}^{10}	Reposicionamento de cirurgias marcadas para dias no início da semana
\mathcal{V}^{11}	Trocas entre duas cirurgias marcadas no final da semana e uma cirurgia marcada no início da semana

4.4. Resultados Computacionais

Para avaliar as heurísticas desenvolvidas, é vantajoso ter os valores ótimos das soluções das instâncias estudadas. Assim, com vista à obtenção destes valores ótimos, os modelos apresentados na Secção 3.4 foram resolvidos com o *software* CPLEX Studio 12.6.2. As heurísticas desenvolvidas foram implementadas em Java, utilizando o *software* Eclipse Luna, e executadas num computador com um processador Intel(R) Core(TM) i5-4590 CPU @3.30GHz, com memória RAM de 8 GB.

Uma vez que para algumas instâncias não foram encontradas soluções ótimas em tempo útil, foi estabelecido um tempo máximo de resolução de 300 segundos por serviço e por turno.

4.4.1. Versão Administração

Para a VA, foram executadas, inicialmente, as duas heurísticas construtivas e, com base nas soluções obtidas, foram aplicadas as heurísticas de melhoria pela ordem enunciada anteriormente, começando pela vizinhança 1 e terminando na vizinhança 11. Quando a solução admissível, antes de ser executada uma vizinhança, é diferente da solução após a pesquisa da vizinhança (a solução melhora), começa a executar-se, de novo, a vizinhança 1, repetindo assim o ciclo de vizinhanças.

Foram experimentadas outras ordens na aplicação das vizinhanças, mas, para todas as versões do problema, a que obteve melhores resultados, ao nível de desvio ao valor da solução ótima e tempo computacional, foi a enunciada na Secção 4.3.

Aplicando as duas heurísticas construtivas às quatro instâncias obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 4.3. É possível observar, para cada instância, o número de cirurgias em lista de espera (CLE) e o número de cirurgias marcadas (CM) com o modelo matemático e com as duas heurísticas construtivas. É também possível observar o GAP médio, em percentagem, referente à solução obtida pelo modelo, no limite de tempo considerado, e o GAP médio, em percentagem, referente a cada heurística construtiva. Optou-se por colocar, nos resultados presentes nesta secção, o número de cirurgias marcadas, uma vez que tem mais significado para os intervenientes no processo, comparativamente ao GAP obtido.

A fórmula de cálculo do GAP referida neste trabalho é dada por:

$$\text{GAP (\%)} = \frac{|\text{valor objetivo da solução obtida} - \text{valor ótimo}|}{\text{valor ótimo}} \times 100$$

Uma vez que os modelos matemáticos não obtiveram sempre soluções ótimas, nos tempos considerados, é calculado o GAP do modelo tendo em conta o valor objetivo da solução obtida pelo modelo e o valor do limite inferior (problema de minimização) ou superior (problema de maximização) para os valores ótimos.

O GAP referente às heurísticas, observado nesta tabela e referido ao longo deste trabalho, é calculado tendo em conta o valor obtido pela heurística e o valor ótimo do modelo matemático. Se o modelo matemático não tiver obtido o valor ótimo, é utilizado o valor do limite inferior (problema de minimização) ou o valor do limite superior (problema de maximização) para os valores ótimos, obtidos na execução dos modelos.

Na Tabela 4.3, é possível observar que a HC1 obtém um valor superior de GAP ao obtido pela HC2 e, em geral, a HC1 agenda um número inferior de cirurgias e a HC2 um número superior, no horizonte de planeamento, comparativamente às agendadas pela solução obtida pelo modelo. Assim, à partida, poder-se-ia dizer que a HC2 é melhor que a HC1.

Tabela 4.3. Comparação entre as duas heurísticas construtivas para a VA

Instâncias	CLE	Modelo		HC1		HC2	
		CM	GAP (%)	CM	GAP (%)	CM	GAP (%)
S1_04.11.13	4574	399	0.07	312	7.43	427	2.17
S2_06.01.14	4276	378	0.10	307	5.40	400	3.63
S3_05.01.15	5689	300	0.12	201	4.49	269	2.73
S4_02.03.15	6395	391	0.07	254	6.28	398	2.61

Aplicando a heurística de melhoramento (HM) às soluções obtidas por ambas as heurísticas construtivas, considerando na HM as 11 vizinhanças descritas anteriormente, obtiveram-se os resultados apresentados nas Tabelas 4.4-4.7, dependendo da instância que é considerada.

Tabela 4.4. Resultados para a VA (S1_04.11.13)

Serviços	Modelo			HC1 + HM			HC2 + HM			Final	
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	GAP (%)
C3b	59			59			60			60	
C3c	41	525967	0.47	46	530965	1.42	45	527779	0.81	45	0.81
CMF	8	4701	0	7	4728	0.57	7	4728	0.57	7	0.57
CPD	18	67169	0	16	67609	0.66	19	67476	0.46	19	0.46
CPL	57	388243	0	57	388483	0.06	58	389550	0.34	57	0.06
GIN	17	152390	0	17	154131	1.14	18	154416	1.33	17	1.14
OFT	77	303102	0.14	77	304977	0.76	77	303336	0.22	77	0.22
ORTa	25	96977	0	26	98543	1.61	25	96982	0.01	25	0.01
ORTb	31	299951	0	32	301971	0.67	32	301717	0.59	32	0.59
OTO	37	230331	0.07	38	231838	0.65	37	231352	0.44	37	0.44
URO	29	121466	0.04	30	122248	0.68	31	122566	0.94	30	0.68
Tot/Méd	399		0.07	405		0.82	409		0.57	406	0.50

Tabela 4.5. Resultados para a VA (S2_06.01.14)

Serviços	Modelo			HC1 + HM			HC2 + HM			Final	
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	GAP (%)
C3b	57	469797	0.15	58	470748	0.35	57	474388	1.13	58	0.35
C3c	42			43			45			43	
CMF	5	2506	0	5	2513	0.28	7	2808	12.05	5	0.28
CPD	16	62058	0	16	62083	0.04	16	62074	0.03	16	0.03
CPL	56	401232	0.08	56	404241	0.75	55	402393	0.29	55	0.29
GIN	20	195037	0	21	197196	1.11	20	197362	1.19	21	1.11
OFT	75	273175	0.06	75	275237	0.82	75	275234	0.81	75	0.81
ORTa	19	293557	0.14	20	296401	1.11	20	296072	1.00	20	1.00
ORTb	26			25			26			26	
OTO	34	209613	0.31	34	210875	0.92	35	211187	1.07	34	0.92
URO	28	109152	0.12	28	109438	0.38	32	110998	1.82	28	0.38
Tot/Méd	378		0.10	381		0.64	388		2.15	381	0.57

Tabela 4.6. Resultados para a VA (S3_05.01.15)

Serviços	Modelo			HC1 + HM			HC2 + HM			Final	
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	GAP (%)
C3b	41	1169597	0.22	39	1174097	0.41	42	1173798	0.38	42	0.38
C3c	46			46			46			46	
OFT	42			41			41			41	
CMF	9	11446	0	9	11452	0.05	11	11741	2.58	9	0.05
CPD	14	99418	0	14	99452	0.03	14	99450	0.03	14	0.03
CPL	18	502525	0	17	504116	0.32	18	502525	0	18	0
GIN	22	448372	0.28	20	449389	0.51	20	451505	0.98	20	0.51
ORTa	17	140166	0	17	147089	4.94	19	152288	8.65	17	4.94
ORTb	24	380888	0	24	382863	0.52	24	380888	0	24	0
OTO	36	285819	0.54	37	286031	0.13	36	286293	0.22	37	0.13
URO	31	218008	0	32	221135	1.43	31	219117	0.51	31	0.51
Tot/Méd	300		0.12	296		0.93	302		1.48	299	0.73

Tabela 4.7. Resultados para a VA (S4_02.03.15)

Serviços	Modelo			HC1 + HM			HC2 + HM			Final	
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	GAP (%)
C3b	67	1317803	0.22	68	1322260	0.56	71	1320349	0.42	71	0.42
C3c	85			81			86			86	
ORTb	37			37			37			37	
CMF	8	7631	0	4	8288	8.61	10	7852	2.90	10	2.90
CPD	17	139954	0	17	140072	0.08	17	139956	0.00	17	0.00
CPL	45	901441	0.15	17	906778	0.59	19	902404	0.11	19	0.11
OFT	19			45			45			45	
GIN	22	391339	0	23	393524	0.56	22	393602	0.58	23	0.56
ORTa	23	105160	0	22	107577	2.30	22	109882	4.49	22	2.30
OTO	37	299254	0.10	38	301037	0.60	39	301842	0.87	38	0.60
URO	31	236808	0.08	30	237311	0.21	31	238935	0.90	30	0.21
Tot/Méd	391		0.07	382		1.69	399		1.28	398	0.89

Nestas tabelas, é possível observar, para o conjunto de serviços considerados: o número de cirurgias marcadas (CM) pelo modelo matemático e pelas heurísticas; o valor objetivo da melhor

solução encontrada pelo modelo matemático dentro do limite de tempo estabelecido (VM) e o GAP associado; os valores objetivo das soluções obtidas pelas heurísticas (VH) que englobam a construtiva e o posterior melhoramento, e o GAP associado; e, por fim, o resultado final onde se considera, para cada serviço, o melhor resultado dos obtidos pela HC1+HM ou pela HC2+HM, e o respetivo GAP. São ainda apresentados os valores totais referentes ao número de cirurgias e a média do valor de GAPs. Quando o modelo não obteve o valor ótimo ($GAP \neq 0$), o número de cirurgias marcadas é referente à melhor solução encontrada pelo modelo no limite de tempo considerado.

Pode verificar-se que, após a heurística de melhoramento para duas das instâncias consideradas (S1_04.11.13 e S4_02.03.15), as soluções obtidas pela HC1+HM são, em média, melhores do que as obtidas pela HC2+HM. Escolhendo para solução final a melhor das obtidas pelas duas heurísticas (HC1+HM e HC2+HM), observa-se que as soluções finais são escolhidas tanto de uma como de outra heurística, não havendo uma heurística que origine consistentemente melhores resultados do que a outra.

Ao escolher como solução final a melhor das duas heurísticas, obtém-se garantidamente um GAP médio menor ou igual aos GAPs médios obtidos por cada uma das duas heurísticas. Assim, por exemplo, para a instância S4_02.03.15, executando a HC1+HM e a HC2+HM obtém-se, respetivamente, GAPs médios de 1.69% e 1.28%. Mas, optando pelas melhores soluções das duas, em cada especialidade ou conjunto de especialidades, obtém-se um GAP final médio de 0.89%.

Para as quatro instâncias consideradas, obtém-se um GAP heurístico médio inferior a 1% e o número de cirurgias marcadas é semelhante ao número de cirurgias marcadas pelo modelo matemático, o que indica que, para a VA, os resultados obtidos na melhor solução das duas heurísticas (HC1+HM e HC2+HM) são de muito boa qualidade.

Nas Tabelas 4.8-4.11, são apresentados os tempos computacionais, em segundos, para a obtenção dos resultados, para esta versão do problema, com o modelo matemático e com as duas heurísticas (HC1+HM e HC2+HM).

Nestas tabelas, é possível observar que, dependendo do serviço considerado, o modelo matemático pode ser bastante rápido a obter uma solução ótima. Em algumas especialidades, o tempo é inferior a um segundo, mas, em outras, não consegue obter uma solução ótima no tempo máximo estipulado. Assim, o tempo das heurísticas, é, quase sempre, inferior ao tempo computacional do modelo matemático e, independentemente da especialidade a considerar, o tempo é, em geral, muito reduzido.

Portanto, para além das heurísticas desenvolvidas para esta versão apresentarem soluções próximas das ótimas, o tempo computacional necessário é bastante reduzido, mesmo considerando as especialidades com mais cirurgias em lista de espera.

Tabela 4.8. Tempo computacional, em segundos, para a VA (S1_04.11.13)

Serv	Modelo	HC1+HM	HC2+HM
C3b	1200.00	9.52	13.59
C3c			
CMF	0.29	0.00	0.00
CPD	0.21	0.05	0.11
CPL	139.19	3.73	1.16
GIN	0.62	0.27	0.49
OFT	600.00	21.05	6.91
ORTa	0.31	0.04	0.07
ORTb	13.19	0.59	0.37
OTO	600.00	1.72	1.62
URO	600.00	0.21	0.76
Total	3513.81	37.18	25.08

Tabela 4.9. Tempo computacional, em segundos, para a VA (S2_06.01.14)

Serv	Modelo	HC1+HM	HC2+HM
C3b	1200.00	10.38	8.39
C3c			
CMF	0.15	0.00	0.00
CPD	1.29	0.04	0.06
CPL	600.00	3.68	3.28
GIN	50.43	0.62	0.39
OFT	600.00	43.37	17.36
ORTa	1200.00	0.27	0.50
ORTb			
OTO	600.00	4.42	2.19
URO	600.00	0.14	0.67
Total	4851.87	62.92	32.84

Tabela 4.10 Tempo computacional, em segundos, para a VA (S3_05.01.15)

Serv	Modelo	HC1+HM	HC2+HM
C3b	1800.00	57.75	64.25
C3c			
OFT			
CMF	0.01	0.00	0.00
CPD	0.87	0.11	0.22
CPL	0.21	2.67	1.72
GIN	600.00	1.34	5.49
ORTa	0.43	0.09	0.07
ORTb	1.24	0.34	0.76
OTO	600.00	2.36	1.99
URO	37.71	0.66	0.84
Total	3040.47	65.32	75.34

Tabela 4.11. Tempo computacional, em segundos, para a VA (S4_02.03.15)

Serv	Modelo	HC1+HM	HC2+HM
C3b	1800.00	205.86	107.36
C3c			
ORTb			
CMF	0.16	0.00	0.00
CPD	0.31	0.28	0.34
CPL	1200.00	22.29	23.99
OFT			
GIN	73.71	0.79	1.20
ORTa	1.25	0.03	0.06
OTO	600.00	2.42	0.62
URO	600.00	1.14	0.62
Total	4275.43	232.81	134.19

Na Figura 4.8, está apresentado um resumo gráfico da eficiência das vizinhanças desenvolvidas para a VA, para as duas heurísticas. As primeiras 4 vizinhanças (\mathcal{V}^1 - \mathcal{V}^4) e as duas últimas (\mathcal{V}^{10} e \mathcal{V}^{11}) não permitem, ou permitem poucas vezes, encontrar uma solução melhor, logo, nos gráficos correspondentes à diminuição no valor objetivo das soluções, estas melhorias não são perceptíveis. O seu tempo de execução, comparativamente às outras vizinhanças, é ínfimo e, por isso, também não é visível nos gráficos.

Para a HC1+HM, das 11 vizinhanças utilizadas, aquelas que correspondem a trocas de cirurgias marcadas por cirurgias não marcadas (\mathcal{V}^6 - \mathcal{V}^9) permitem, mais vezes, encontrar soluções melhores. Destas, a vizinhança \mathcal{V}^7 (troca de uma cirurgia marcada por duas cirurgias em lista de espera) é aquela que provoca uma maior diminuição no valor objetivo das soluções. Tal acontece devido ao facto da HC1 agendar menos cirurgias que a solução obtida pelo modelo, criando assim, nas trocas locais, mais possibilidades de agendamento de cirurgias em lista de espera.

Para além da vizinhança \mathcal{V}^7 provocar uma maior diminuição no valor objetivo das soluções, é a vizinhança que apresenta uma maior melhoria média no valor objetivo, por segundo e por troca, sendo, por isso, a vizinhança mais eficiente para a HC1+HM.

Para a HC2+HM, as vizinhanças \mathcal{V}^5 , \mathcal{V}^6 e \mathcal{V}^8 são aquelas que permitem uma maior diminuição do valor objetivo das soluções. Destas, a vizinhança \mathcal{V}^8 (troca de duas cirurgias marcadas por uma cirurgia em lista de espera) é aquela que apresenta uma maior melhoria média no valor objetivo por segundo, sendo, por isso, a vizinhança mais eficiente para esta heurística. Tal acontece devido ao facto da HC2 agendar mais cirurgias que a solução obtida pelo modelo, criando assim, nas trocas locais, mais possibilidades de reduzir o número de cirurgias marcadas, de forma a agendar as cirurgias com uma maior duração, mas que contribuem para uma solução melhor.

Para ambas as heurísticas (HC1+HM e HC2+HM), a vizinhança \mathcal{V}^5 (marca cirurgias em lista de espera na agenda cirúrgica semanal) provoca uma das melhores melhorias no valor objetivo, por troca. É interessante notar que a vizinhança \mathcal{V}^{11} , comparativamente às outras vizinhanças, apresenta uma melhoria no valor objetivo e um tempo computacional irrisório, mas para as duas heurísticas, é a quarta vizinhança com uma melhor melhoria média no valor objetivo, por segundo.

De todas as vizinhanças, a \mathcal{V}^9 é aquela que provoca um maior gasto de tempo computacional, para ambas as heurísticas, visível nos gráficos referentes ao tempo computacional e à melhoria média no valor objetivo, por segundo. Tal acontece porque existem muitas soluções na sua vizinhança. No entanto, a \mathcal{V}^9 apresenta uma boa oportunidade para sair de ótimos locais, permitindo a busca por uma solução melhor.

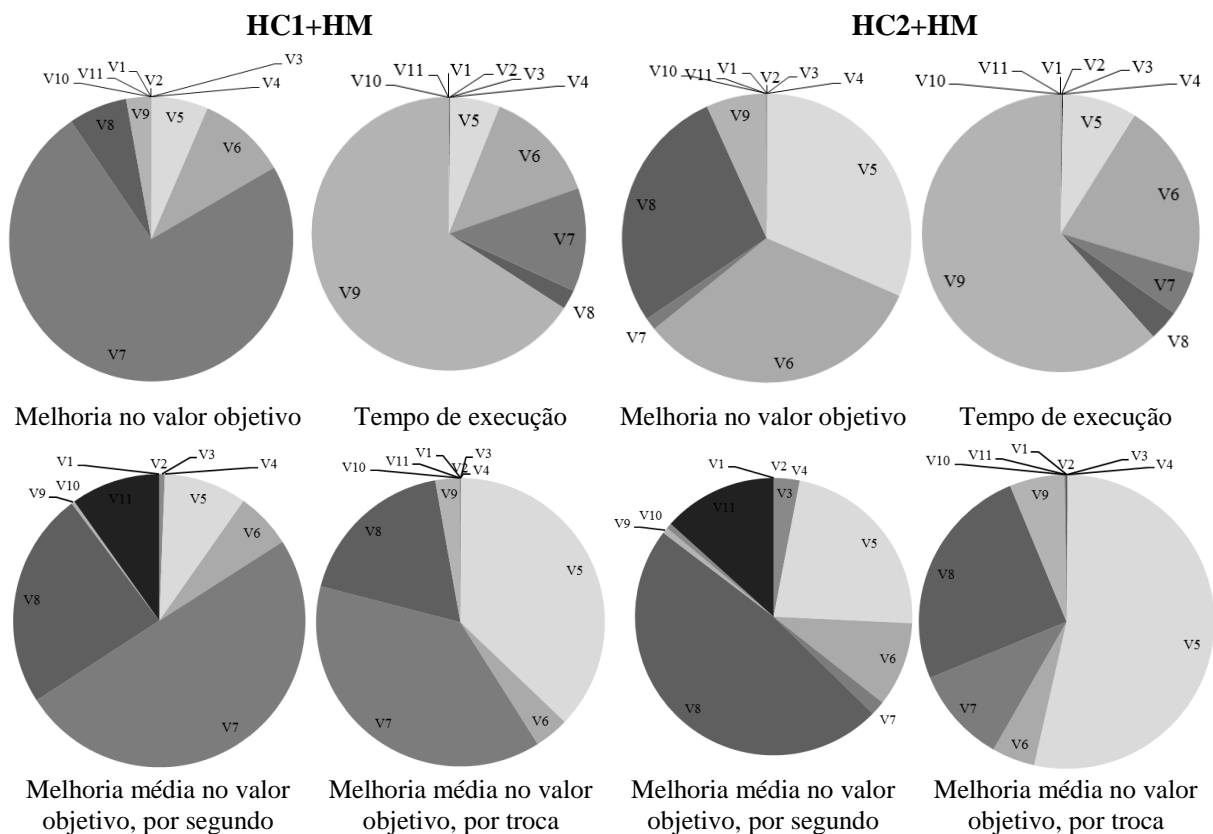


Figura 4.8. Resumo da eficiência das vizinhanças desenvolvidas para a VA

4.4.2. Versão Cirurgiões

Para a VC, foram executadas, inicialmente, as heurísticas para os turnos da manhã e, com base na solução obtida, executaram-se as heurísticas para os turnos da tarde.

4.4.2.1. Turnos da manhã

Para a VC-TM, foram executadas, inicialmente, as duas heurísticas construtivas (HC1 e HC2) e, com base nas soluções obtidas, foram aplicadas as heurísticas de melhoramento aplicando as vizinhanças, pela ordem enunciada anteriormente, começando pela vizinhança 1 e terminando na vizinhança 11. Com base nos resultados encontrados, observou-se que, após a heurística de melhoramento, as soluções obtidas pela HC2+HM são sempre melhores que as obtidas com a HC1+HM, exceto para uma especialidade de uma das instâncias. Assim, foi visível que, para esta versão do problema, e ao contrário do que ocorreu com a VA, não compensa escolher a solução final com base na melhor das duas heurísticas, uma vez que uma obtém sempre melhores resultados do que a outra.

Com base nos gráficos presentes na Figura 4.9 e analisando as 11 vizinhanças executadas na HC2+HM, observou-se que a vizinhança \mathcal{V}^9 é aquela que permite mais trocas na solução, mas, contabilizando a melhoria do valor objetivo para todas as trocas, a melhoria que esta provoca não é significativa, comparativamente ao tempo computacional gasto (mais de 80% do tempo computacional é despendido na \mathcal{V}^9). Assim, com a observação destes resultados, excluiu-se esta vizinhança da

heurística de melhoramento, passando a ser executadas as vizinhanças: $\mathcal{V}^1 - \mathcal{V}^8$, \mathcal{V}^{10} e \mathcal{V}^{11} , pela ordem respectiva.

Para a HC2+HM, das vizinhanças executadas, \mathcal{V}^5 e \mathcal{V}^6 são aquelas que permitem uma maior melhoria no valor objetivo, mas contabilizando o tempo de execução, isto é, a melhoria média no valor objetivo, por segundo, a vizinhança \mathcal{V}^5 é a melhor, destacando-se das restantes vizinhanças. Tal já não acontece com a vizinhança \mathcal{V}^6 que permite uma evidente melhoria no valor objetivo, comparativamente às outras vizinhanças executadas, mas, em relação à melhoria média no valor objetivo, por segundo, não é muito eficiente.

Apesar da vizinhança \mathcal{V}^7 não ser uma vizinhança que melhora muito o valor objetivo das soluções, apresenta uma boa melhoria média comparativamente ao tempo computacional gasto na sua execução e, depois da vizinhança \mathcal{V}^5 , é a que apresenta uma melhor melhoria média no valor objetivo das soluções, por troca realizada.

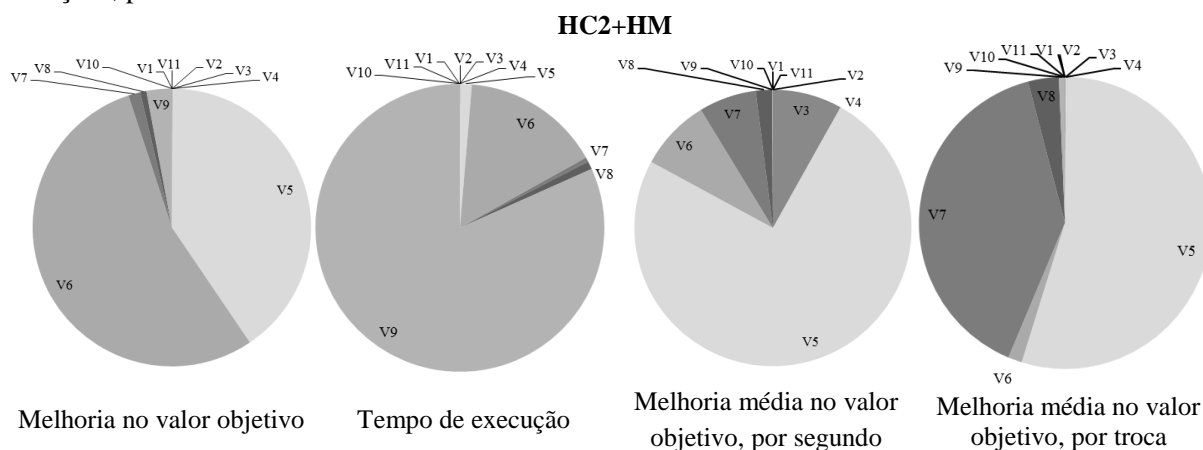


Figura 4.9. Resumo da eficiência das vizinhanças para a HC2+HM para a VC-TM

Aplicando a HM às soluções obtidas para a HC2, obtiveram-se os resultados apresentados nas Tabelas 4.12-4.15, dependendo da instância que é considerada. Estas tabelas apresentam a mesma estrutura das Tabelas 4.4-4.7, mas, como nesta versão e neste turno só é utilizada uma heurística construtiva, os resultados apresentados para a HC2+HM são os resultados finais.

Tabela 4.12. Resultados para a VC-TM (S1_04.11.13)

Serv	Modelo			HC2 + HM		
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)
C3b	60	2674452	0	58	2678970	0.17
C3c	51			51		
CMF	5	6180	0	5	6180	0
CPD	18	129707	0	18	129719	0.01
CPL	20	764405	0	20	764423	0.00
GIN	27	214534	0.03	27	214630	0.07
OFT	54	962381	0	55	963067	0.07
ORTa	26	112945	0	25	113397	0.40
ORTb	32	636398	0	32	636406	0.00
OTO	43	661209	0.02	42	662040	0.13
URO	44	388259	0.05	44	389169	0.23
Tot/ Méd	380		0.01	377		0.11

Tabela 4.13. Resultados para a VC-TM (S2_06.01.14)

Serv	Modelo			HC2 + HM		
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)
C3b	55	1870937	0.05	55	1872950	0.15
C3c	48			47		
CMF	4	4120	0	4	4120	0
CPD	18	134762	0	18	134762	0
CPL	20	854987	0	20	854987	0
GIN	26	300368	0.02	26	300370	0.02
OFT	53	831169	0	54	831686	0.06
ORTa	25	617886	0	24	619887	0.32
ORTb	32			32		
OTO	43	729908	0.07	43	730068	0.09
URO	43	388392	0	41	390625	0.57
Tot/ Méd	367		0.02	364		0.14

Tabela 4.14. Resultados para a VC-TM (S3_05.01.15)

Serv	Modelo			HC2 + HM		
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)
C3b	58			56		
C3c	50	4428929	0.05	48	4436038	0.21
OFT	74			74		
CMF	6	6049	0	6	6049	0
CPD	20	170968	0	20	170968	0
CPL	20	885377	0	20	885377	0
GIN	26	417837	0	27	418288	0.11
ORTa	27	84504	0	27	85074	0.67
ORTb	43	587891	0	43	588697	0.14
OTO	50	620641	0.01	50	621563	0.16
URO	43	658520	0	41	660381	0.28
Tot/ Méd	417		0.00	412		0.17

Tabela 4.15. Resultados para a VC-TM (S4_02.03.15)

Serv	Modelo			HC2 + HM		
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)
C3b	62			62		
C3c	51	4383007	0	53	4386856	0.09
ORTb	44			49		
CMF	5	8348	0	5	8348	0
CPD	21	1237135	0	21	1237177	0.00
CPL	20	2870355	0.01	20	2871797	0.06
OFT	66			64		
GIN	24	381681	0.05	25	382237	0.19
ORTa	27	84313	0	28	84817	0.60
OTO	49	747436	0.04	45	748024	0.08
URO	44	696710	0	41	699063	0.34
Tot/ Méd	413		0.01	413		0.17

Nestas tabelas, verifica-se que, para as quatro instâncias consideradas, é obtido um GAP médio, referente às heurísticas, inferior a 0.17% e, para várias especialidades, a solução obtida é solução ótima. O número de cirurgias marcadas pela heurística é semelhante ao número de cirurgias marcadas pelo modelo matemático, o que indica que, para a VC-TM, os resultados obtidos são muito bons, apesar de ter sido considerada apenas uma heurística e de ter sido retirada uma vizinhança.

4.4.2.2. Turnos da tarde

Para a VC-TT, as conclusões retiradas da comparação das soluções obtidas pela HC1 e pela HC2 foram semelhantes às obtidas para os turnos da manhã nesta versão, logo optou-se por aplicar a HM às soluções obtidas apenas pela HC2.

Como a função objetivo referente a este turno não contém uma penalização por marcar cirurgias no final da semana, então não é necessário fazer o reposicionamento de cirurgias de forma a serem realizadas mais cirurgias no início da semana (vizinhanças \mathcal{V}^{10} e \mathcal{V}^{11}).

Na Figura 4.10, está apresentado um resumo gráfico da eficiência das vizinhanças desenvolvidas para a VC-TT, para a HC2+HM. É possível observar que as vizinhanças \mathcal{V}^5 , \mathcal{V}^6 e \mathcal{V}^9 são aquelas que mais permitem melhorar o valor objetivo das soluções. Destas, a vizinhança \mathcal{V}^6 (troca de uma cirurgia marcada por uma cirurgia em lista de espera) é aquela que apresenta uma maior melhoria no valor objetivo das soluções, mas, relacionando a melhoria no valor objetivo com o tempo computacional, apresenta uma eficiência bastante inferior à vizinhança \mathcal{V}^5 que, de todas as vizinhanças, é aquela que apresenta uma maior melhoria no valor objetivo, por segundo.

Em relação à melhoria média no valor objetivo, por troca, assim como na VA e na VC-TM, a vizinhança com um melhor valor é a vizinhança \mathcal{V}^5 .

Nos turnos da manhã, optou-se por retirar a vizinhança \mathcal{V}^9 , mas, para este problema, observou-se que, apesar desta ser a vizinhança que consome mais tempo computacional, como pode ser observado na Figura 4.10, a sua inclusão na heurística permite obter uma melhoria considerável do valor objetivo das soluções, ao contrário do verificado nos turnos da manhã. Assim, optou-se por considerar esta vizinhança neste problema, e, por isso, as vizinhanças executadas nesta versão, nos turnos da tarde, são $\mathcal{V}^1 - \mathcal{V}^9$.

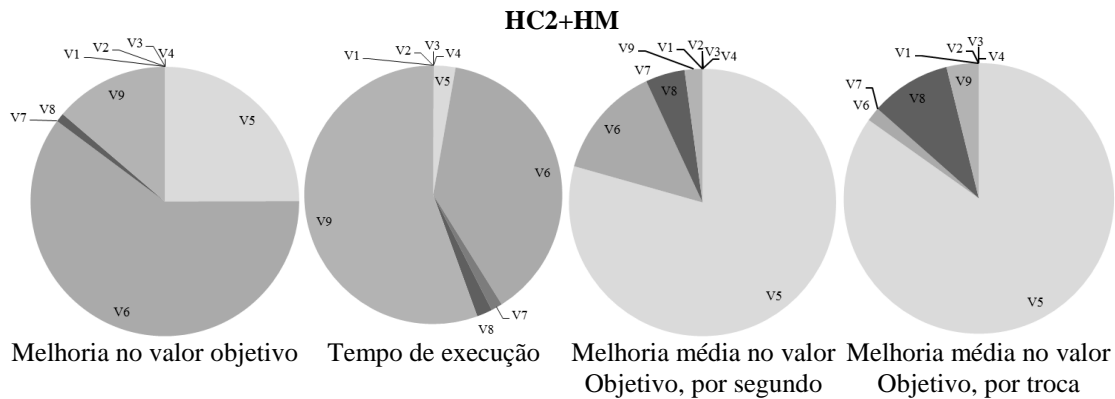


Figura 4.10. Resumo da eficiência das vizinhanças para a HC2+HM para a VC-TT

Os resultados obtidos com a aplicação da HM às soluções obtidas com a HC2 estão apresentados nas Tabelas 4.16-4.19, dependendo da instância que é considerada. Estas tabelas apresentam a mesma estrutura das Tabelas 4.4-4.7 e, assim como nos turnos da manhã, os resultados apresentados para a HC2+HM são os resultados finais.

Tabela 4.16. Resultados para a VC-TT (S1_04.11.13)

Serv	Modelo			HC2 + HM		
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)
C3b	57			57		
C3c	41	96.1514	0.13	41	96.0337	0.13
CMF	3	2.3943	0	3	2.3943	0
CPD	7	6.4097	0	7	6.3969	0.20
CPL	54	51.9954	0	54	51.6161	0.73
GIN	3	2.9505	0	3	2.9505	0
OFT	36	34.8124	0	36	34.8124	0
ORTa	9	7.4188	0	10	7.2102	2.81
ORTb	18	16.7606	0	19	16.5724	1.12
OTO	16	15.0076	0	16	14.972	0.24
URO	16	14.8228	0	17	14.6186	1.38
Tot/ Méd	260		0.01	263		0.66

Tabela 4.17. Resultados para a VC-TT (S2_06.01.14)

Serv	Modelo			HC2 + HM		
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)
C3b	56			56		
C3c	40	92.8217	0	40	92.8118	0.01
CMF	3	2.1579	0	3	2.1579	0
CPD	7	5.8246	0	7	5.8246	0
CPL	54	52.0097	0.39	53	50.8627	2.59
GIN	3	2.8806	0	3	2.8806	0
OFT	35	34.3047	0	35	34.3047	0
ORTa	7	20.3182	0	7	20.2539	0.32
ORTb	16			16		
OTO	16	14.6061	0	15	14.4953	0.76
URO	18	15.9945	0	16	15.2236	4.82
Tot/ Méd	255		0.04	251		0.94

Tabela 4.18. Resultados para a VC-TT (S3_05.01.15)

Serv	Modelo			HC2 + HM		
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)
C3b	-			-		
C3c	-	-	-	-	-	-
OFT	-			-		
CMF	5	3.3678	0	5	3.3678	0
CPD	-	-	-	-	-	-
CPL	-	-	-	-	-	-
GIN	4	3.1331	0	4	3.1331	0
ORTa	-	-	-	-	-	-
ORTb	-	-	-	-	-	-
OTO	-	-	-	-	-	-
URO	6	5.3548	0	6	5.3548	0
Tot/ Méd	15		0	15		0

Tabela 4.19. Resultados para a VC-TT (S4_02.03.15)

Serv	Modelo			HC2 + HM		
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)
C3b	42			41		
C3c	44	92.4028	0.83	40	91.0317	2.29
ORTb	13			13		
CMF	4	2.5696	0	4	2.5696	0
CPD	8	7.7263	0	8	7.7263	0
CPL	-	-	-	-	-	-
OFT	-	-	-	-	-	-
GIN	3	2.9488	0	3	2.9488	0
ORTa	10	8.1922	0	10	8.1800	0.15
OTO	-	-	-	-	-	-
URO	6	5.4459	0	6	5.4459	0
Tot/ Méd	130		0.14	125		0.41

Pode verificar-se que, para as quatro instâncias consideradas, obtém-se um GAP médio, referente à heurística, inferior a 0.94%. Para a instância S3_05.01.15, para as três especialidades que operam no turno da tarde, as soluções obtidas pela heurística são todas ótimas. Nas restantes três instâncias, a HC2+HM obtém também soluções ótimas para um número significativo de especialidades.

Nas especialidades em que são obtidos GAPs mais elevados (2.81% para a instância S1_04.11.13 e 4.82% para a instância S2_06.01.14), a heurística marca menos cirurgias que as agendadas pelo modelo matemático. Este facto pode levar a que ocorra uma diferença significativa entre os valores das duas soluções, levando a um GAP mais elevado.

Nas Tabelas 4.20-4.23, são apresentados os tempos computacionais, em segundos, para a obtenção dos resultados exatos e heurísticos, para esta versão do problema, incluindo os turnos da manhã e os da tarde.

Tabela 4.20. Tempo computacional, em segundos, para a VC (S1_04.11.13)

Serv	Turno da Manhã		Turno da Tarde	
	Modelo	HC2 +HM	Modelo	HC2 +HM
C3b C3c	46.94	10.20	600.00	32.18
CMF	0.04	0.00	0.01	0.00
CPD	0.15	0.06	0.04	0.06
CPL	24.70	4.98	11.99	27.21
GIN	300.00	0.64	40.20	0.38
OFT	42.89	5.49	31.15	18.07
ORTa	0.37	0.05	0.04	0.00
ORTb	0.28	0.33	2.45	0.19
OTO	300.00	1.56	5.16	2.23
URO	300.00	0.53	0.83	0.31
Tot	1015.37	23.84	691.87	80.63

Tabela 4.21. Tempo computacional, em segundos, para a VC (S2_06.01.14)

Serv	Turno da Manhã		Turno da Tarde	
	Modelo	HC2 +HM	Modelo	HC2 +HM
C3b C3c	600.00	6.69	71.64	38.37
CMF	0.04	0.00	0.06	0.00
CPD	0.07	0.05	0.76	0.06
CPL	0.11	1.58	300.00	8.71
GIN	300.00	0.63	0.60	0.52
OFT	1.21	1.98	8.06	6.54
ORTa	62.92	0.33	1.85	0.59
OTO	300.00	1.28	8.13	7.86
URO	1.00	0.69	0.61	0.58
Tot	1265.35	13.23	391.71	63.23

Tabela 4.22. Tempo computacional, em segundos, para a VC (S3_05.01.15)

Serv	Turno da Manhã		Turno da Tarde	
	Modelo	HC1 +HM	Modelo	HC2 +HM
C3b C3c OFT	900.00	43.63	-	-
CMF	0.75	0.00	0.05	0.00
CPD	0.31	0.10	-	-
CPL	0.17	2.62	-	-
GIN	44.02	1.39	0.05	0.36
ORTa	4.47	0.10	-	-
ORTb	0.91	0.34	-	-
OTO	300.00	3.09	-	-
URO	1.26	1.33	0.53	1.08
Tot	1251.89	52.60	0.63	1.44

Tabela 4.23. Tempo computacional, em segundos, para a VC (S4_02.03.15)

Serv	Turno da Manhã		Turno da Tarde	
	Modelo	HC2 +HM	Modelo	HC2 +HM
C3b C3c ORTb	60.91	32.39	900.00	173.29
CMF	0.04	0.00	0.00	0.00
CPD	0.93	0.20	3.23	0.47
CPL	600.00	18.17	-	-
OFT	300.00	1.39	0.42	0.55
GIN	0.82	0.06	0.58	0.03
OTO	300.00	7.43	-	-
URO	7.71	1.44	0.06	0.86
Tot	1270.41	61.08	904.29	175.20

Nestas tabelas, é possível observar que, comparando com os resultados obtidos para a VA, o modelo matemático é mais rápido a obter uma solução ótima quando se divide a marcação de cirurgias

por turnos. E, em geral, permite a resolução ótima de mais modelos no tempo máximo estipulado uma vez que os problemas apresentam uma dimensão inferior.

Observando o tempo das heurísticas, estes são geralmente inferiores aos tempos computacionais do modelo matemático e, independentemente da especialidade considerada, o tempo é, em geral, bastante reduzido. O conjunto de serviços em que tal não se verifica são o C3b, C3c e ORTb, que são conjugados na instância S4_02.03.15. Estes serviços apresentam um tempo computacional, para o turno da tarde, de aproximadamente 3 minutos. Tal acontece porque, neste caso, a solução obtida pela heurística construtiva tem um valor bastante longe do ótimo, levando a que ocorram muitas trocas durante a heurística de melhoramento, o que aumenta o tempo computacional.

4.4.3. Versão Mista

Para a VM, assim como para a VC, foram executadas, inicialmente, as heurísticas para os turnos da manhã e, com base na solução final, executaram-se as heurísticas para os turnos da tarde.

4.4.3.1. Turnos da manhã

Uma vez que a VM-TM tem o mesmo modelo matemático da VA, então, a nível de heurísticas, é espectável que as conclusões retiradas para uma das versões sejam as mesmas da outra. Assim, aplicou-se a esta versão, a mesma lógica já aplicada para a VA, ou seja, aplicou-se a HM às soluções obtidas por ambas as heurísticas construtivas. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 4.24-4.27 e apresentam a mesma estrutura das Tabelas 4.4-4.7.

Tabela 4.24. Resultados para a VM-TM (S1_04.11.13)

Serviços	Modelo			HC1 + HM			HC2 + HM			Final	
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	GAP (%)
C3b	35			38			35			35	
C3c	26	626416	0	26	629214	0.45	27	628751	0.37	27	0.37
CMF	4	5282	0	4	5282	0	4	5282	0	4	0
CPD	12	69463	0	12	69463	0	12	69463	0	12	0
CPL	20	483130	0	19	485056	0.40	20	483471	0.07	20	0.07
GIN	16	159273	0	16	160913	1.03	16	161457	1.37	16	1.03
OFT	42	386699	0.02	41	388777	0.56	42	386752	0.03	42	0.03
ORTa	18	115730	0	17	119664	3.40	18	115925	0.17	18	0.17
ORTb	17	346546	0	17	347421	0.25	17	347323	0.22	17	0.22
OTO	28	252023	0.20	30	253575	0.82	30	252581	0.42	30	0.42
URO	21	133962	0.14	24	136900	2.33	23	135436	1.24	23	1.24
Tot/Méd	239		0.04	244		0.92	244		0.39	244	0.36

Tabela 4.25. Resultados para a VM-TM (S2_06.01.14)

Serviços	Modelo			HC1 + HM			HC2 + HM			Final	
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	GAP (%)
C3b	32	563120	0	33	565992	0.51	33	566945	0.68	33	0.51
C3c	27			28			28				
CMF	3	3369	0	3	3369	0	3	3369	0	3	0
CPD	10	66601	0	10	66601	0	13	67529	1.39	10	0
CPL	18	490936	0	18	490970	0.01	18	491029	0.02	18	0.01
GIN	19	204384	0.60	18	204546	0.68	18	206631	1.71	18	0.68
OFT	40	355564	0.14	39	357121	0.44	40	356837	0.36	40	0.36
ORTa	13	367193	0	13	367195	0.00	15	369940	0.75	13	0.00
ORTb	16			16			18				
OTO	27	229252	0.01	29	232444	1.40	28	229917	0.30	28	0.30
URO	20	119903	0	22	121249	1.12	23	122795	2.41	22	1.12
Tot/Méd	225		0.08	229		0.46	237		0.85	229	0.33

Tabela 4.26. Resultados para a VM-TM (S3_05.01.15)

Serviços	Modelo			HC1 + HM			HC2 + HM			Final	
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	GAP (%)
C3b	41	1169600	0.21	39	1174097	0.41	42	1173798	0.38	42	0.38
C3c	46			46			46				
OFT	42			41			41			41	
CMF	6	12385	0	3	12594	1.69	6	12385	0	6	0
CPD	14	99418	0	14	99452	0.03	14	99450	0.03	14	0.03
CPL	18	502525	0	17	504116	0.32	18	502527	0.00	18	0.00
GIN	19	456940	0	17	458973	0.44	18	458908	0.43	18	0.43
ORTa	17	140166	0	17	147089	4.94	19	152288	8.65	17	4.94
ORTb	24	380888	0	24	382863	0.52	24	380888	0	24	0
OTO	36	285817	0.05	37	286031	0.13	36	286293	0.22	37	0.13
URO	27	225453	0	27	226981	0.68	27	225522	0.03	27	0.03
Tot/Méd	290		0.03	282		1.02	291		1.08	290	0.66

Tabela 4.27. Resultados para a VM-TM (S4_02.03.15)

Serviços	Modelo			HC1 + HM			HC2 + HM			Final	
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)	CM	GAP (%)
C3b	45	1494938	0.06	44	1502144	0.48	45	1497976	0.20	45	0.20
C3c	46			44			46				
ORTb	28			28			27			27	
CMF	6	8507	0	6	8809	3.55	6	8507	0	6	0
CPD	11	143360	0	11	143360	0	11	143360	0	11	0
CPL	19	901441	0.05	17	906778	0.59	19	902404	0.11	19	0.11
OFT	45			45			45				
GIN	19	402963	0	19	403005	0.01	19	403180	0.05	19	0.01
ORTa	16	145638	0	16	147860	1.53	16	150120	3.08	16	1.53
OTO	37	299254	0.01	38	301037	0.60	39	301842	0.87	38	0.60
URO	27	245349	0.08	27	248608	1.33	27	246384	0.42	27	0.42
Tot/Méd	299		0.03	295		1.01	300		0.59	299	0.36

Pode verificar-se que, para as quatro instâncias consideradas, obtém-se um GAP heurístico médio final inferior a 0.66% e, em geral, o número de cirurgias marcadas pelas heurísticas é semelhante ao número de cirurgias marcadas pelo modelo matemático.

Comparando o número de vezes que são utilizadas as soluções de cada uma das duas heurísticas, para a instância S1_04.11.13, considerou-se mais vezes as soluções da HC2+HM, mas, para a instância S2_06.01.14, verificou-se o contrário. Tal indica que, como tinha sido concluído no caso da VA, é importante escolher-se a melhor solução das duas heurísticas, uma vez que ambas produzem bons resultados e nenhuma é consistentemente melhor do que a outra.

Assim, como ocorreu nas versões anteriores, as heurísticas HC1+HM e HC2+HM obtêm bons resultados, para os turnos da manhã, nesta versão do problema, e, em alguns casos, conseguem mesmo atingir soluções ótimas.

4.4.3.2. Turnos da tarde

Uma vez que a VM-TT tem o mesmo modelo matemático da VC-TT, então, a nível de heurísticas, é também espectável que as conclusões sejam as mesmas. Portanto, foi utilizada a mesma metodologia da VC-TT, ou seja, aplicou-se a HM, com as vizinhanças $\mathcal{V}^1 - \mathcal{V}^9$, às soluções obtidas pela HC2. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 4.28-4.31.

As conclusões retiradas destes resultados são similares às conclusões obtidas com os resultados da VC-TT, ou seja, as soluções heurísticas são boas e, em muitos casos, são soluções ótimas do problema.

Tabela 4.28. Resultados para a VM-TT (S1_04.11.13)

Serv	Modelo			HC2 + HM		
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)
C3b	61	104.7099	1.13	59	101.2855	4.35
C3c	45			43		
CMF	4	3.4795	0	4	3.4795	0
CPD	9	7.8821	0	9	7.8821	0
CPL	54	52.6722	0	53	51.8847	1.50
GIN	5	4.7857	0	5	4.7857	0
OFT	49	44.9852	0.03	50	44.556	0.96
ORTa	13	11.9983	0	12	11.7475	2.09
ORTb	22	21.2233	0.15	22	21.2022	0.25
OTO	21	19.8459	0	20	19.2955	2.77
URO	21	19.5641	0	21	19.5613	0.01
Tot/ Méd	304		0.13	298		1.19

Tabela 4.29. Resultados para a VM-TT (S2_06.01.14)

Serv	Modelo			HC2 + HM		
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)
C3b	57	97.2867	0.06	57	96.4562	0.85
C3c	42			41		
CMF	4	2.5217	0	4	2.5217	0
CPD	9	8.0746	0	8	7.5855	6.06
CPL	54	52.9792	0	53	52.1085	1.64
GIN	5	4.3419	0	5	4.3419	0
OFT	48	44.8109	0	48	44.5833	0.51
ORTa	12	32.1807	0	11	32.1729	0.02
ORTb	22			22		
OTO	21	20.1144	0	21	20.0354	0.39
URO	20	18.8623	0	19	18.8261	0.19
Tot/ Méd	294		0.01	289		1.07

Tabela 4.30. Resultados para a VM-TT (S3_05.01.15)

Serv	Modelo			HC2 + HM		
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)
C3b	-	-	-	-	-	-
C3c	-	-	-	-	-	-
OFT	-	-	-	-	-	-
CMF	5	3.3333	0	5	3.3333	0
CPD	-	-	-	-	-	-
CPL	-	-	-	-	-	-
GIN	4	3.8258	0	4	3.8258	0
ORTa	-	-	-	-	-	-
ORTb	-	-	-	-	-	-
OTO	-	-	-	-	-	-
URO	7	6.7022	0	7	6.7022	0
Tot/ Méd	16			16 0		

Tabela 4.31. Resultados para a VM-TT (S4_02.03.15)

Serv	Modelo			HC2 + HM		
	CM	VM	GAP (%)	CM	VH	GAP (%)
C3b	45	-	-	44	-	-
C3c	44	104.1597	0.06	44	103.9554	0.26
ORTb	16	-	-	16	-	-
CMF	4	3.5263	0	4	3.5263	0
CPD	11	8.1402	0	11	8.1402	0
CPL	-	-	-	-	-	-
OFT	-	-	-	-	-	-
GIN	4	3.8934	0	4	3.8934	0
ORTa	13	11.9878	0	13	11.9878	0
OTO	-	-	-	-	-	-
URO	7	6.8203	0	7	6.8203	0
Tot/ Méd	144			143 0.04		

Nas Tabelas 4.32-4.35, estão apresentados os tempos computacionais, em segundos, para a obtenção dos resultados exatos e heurísticos, para esta versão do problema, incluindo os turnos da manhã e os da tarde.

Nestas tabelas, comparando o tempo computacional dos modelos do turno da manhã com os do turno da tarde, é possível observar que os da manhã têm maior dificuldade em ser resolvidos, à semelhança da VA e, os turnos da tarde, à semelhança da VC-TT, são de mais fácil resolução, pelas restrições e função objetivo do modelo, e por, em geral, existirem menos blocos disponíveis para marcação de cirurgias à tarde.

Observando o tempo das heurísticas, estes são quase sempre inferiores aos tempos computacionais do modelo matemático e, independentemente da especialidade considerada, o tempo é, em geral, bastante reduzido, sendo ligeiramente superior para algumas especialidades, pelas razões já apresentadas anteriormente.

Tabela 4.32. Tempo computacional, em segundos, para a VM (S1_04.11.13)

Serv	Turno da Manhã			Turno da Tarde	
	Modelo	HC1 +HM	HC2 +HM	Modelo	HC2 +HM
C3b	19.16	5.00	3.79	600.00	45.39
C3c	19.16	5.00	3.79	600.00	45.39
CMF	0.07	0.00	0.00	0.02	0.00
CPD	0.49	0.05	0.06	0.98	0.05
CPL	0.39	1.29	2.23	1.49	25.39
GIN	0.66	0.29	0.28	0.01	0.17
OFT	300.00	5.46	3.06	300.00	29.41
ORTa	0.28	0.03	0.03	0.05	0.00
ORTb	194.37	0.28	0.16	300.00	0.92
OTO	300.00	1.09	0.84	0.29	2.84
URO	300.00	0.22	0.18	0.64	1.36
Tot	1115.42	13.71	10.63	1203.48	105.53

Tabela 4.33. Tempo computacional, em segundos, para a VM (S2_06.01.14)

Serv	Turno da Manhã			Turno da Tarde	
	Modelo	HC1 +HM	HC2 +HM	Modelo	HC2 +HM
C3b	6.28	3.93	3.64	600.00	21.12
C3c	6.28	3.93	3.64	600.00	21.12
CMF	0.11	0.00	0.00	0.01	0.00
CPD	0.32	0.02	0.03	0.12	0.05
CPL	0.57	1.22	3.87	1.96	8.49
GIN	300.00	0.39	0.74	0.04	0.22
OFT	300.00	4.38	12.59	1.36	24.12
ORTa	3.16	0.20	0.19	0.28	0.42
ORTb	3.16	0.20	0.19	0.28	0.42
OTO	300.00	1.42	0.94	0.78	3.09
URO	212.49	0.25	0.23	0.51	0.34
Tot	1122.93	11.81	22.23	605.06	57.85

Tabela 4.34. Tempo computacional, em segundos, para a VM (S3_05.01.15)

Serv	Turno da Manhã			Turno da Tarde	
	Modelo	HC1 +HM	HC2 +HM	Modelo	HC2 +HM
C3b					
C3c	900.00	55.07	60.40	-	-
OFT					
CMF	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00
CPD	2.88	0.11	0.19	-	-
CPL	0.20	2.43	4.81	-	-
GIN	76.23	1.11	1.91	0.65	0.75
ORTa	0.40	0.05	0.05	-	-
ORTb	1.28	0.28	0.72	-	-
OTO	300.00	2.21	1.86	-	-
URO	30.69	0.70	1.42	0.11	0.49
Tot	1311.72	61.96	71.36	0.80	1.24

Tabela 4.35. Tempo computacional, em segundos, para a VM (S4_02.03.15)

Serv	Turno da Manhã			Turno da Tarde	
	Modelo	HC1 +HM	HC2 +HM	Modelo	HC2 +HM
C3b					
C3c	900.00	113.96	57.55	900.00	297.14
ORTb					
CMF	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00
CPD	0.13	0.23	0.33	0.01	0.22
CPL	600.00	20.50	32.87	-	-
OFT					
GIN	65.93	0.81	1.03	0.16	0.86
ORTa	1.02	0.03	0.03	0.28	0.03
OTO	300.00	2.19	1.20	-	-
URO	300.00	1.01	0.30	0.21	0.45
Tot	2167.11	138.73	93.31	900.67	298.70

4.5. Conclusões

Com os testes realizados, optou-se por utilizar, para cada versão do problema, as heurísticas construtivas e as vizinhanças apresentadas na Tabela 4.36.

Tabela 4.36. Resumo das heurísticas utilizadas em cada versão

Versão	Construtivas	Vizinhanças
VA	HC1 e HC2	$\nu^1 - \nu^{11}$
VC-TM	HC2	$\nu^1 - \nu^8, \nu^{10}, \nu^{11}$
VC-TT	HC2	$\nu^1 - \nu^9$
VM-TM	HC1 e HC2	$\nu^1 - \nu^{11}$
VM-TT	HC2	$\nu^1 - \nu^9$

De maneira a concluir a análise da qualidade das soluções obtidas, apresenta-se, nas Tabelas 4.37-4.39, um breve resumo dos resultados, com o valor mínimo (Min), médio (Méd) e máximo (Máx) referentes ao GAP das heurísticas, em percentagem, e ao tempo computacional, em segundos, obtidos para as quatro instâncias e para as três versões do problema.

Tabela 4.37. Resumo dos resultados para a VA

Instâncias	GAP (%)			Tempo (s)		
	Min	Méd	Máx	Min	Méd	Máx
S1_04.11.13	0.01	0.50	1.14	0.00	6.23	27.96
S2_06.01.14	0.03	0.57	1.11	0.00	10.64	60.73
S3_05.01.15	0	0.73	4.94	0.00	15.63	122.00
S4_02.03.15	0.00	0.89	2.90	0.00	45.88	313.22

Tabela 4.38. Resumo dos resultados para a VC

Instâncias	Turno da Manhã						Turno da Tarde					
	GAP (%)			Tempo (s)			GAP (%)			Tempo (s)		
	Min	Méd	Máx	Min	Méd	Máx	Min	Méd	Máx	Min	Méd	Máx
S1_04.11.13	0	0.11	0.40	0.00	2.38	10.20	0	0.66	2.81	0.00	8.06	32.18
S2_06.01.14	0	0.14	0.57	0.00	1.47	6.69	0	0.94	4.82	0.00	7.03	38.37
S3_05.01.15	0	0.17	0.67	0.00	5.84	43.63	0	0	0	0.00	0.21	1.08
S4_02.03.15	0	0.17	0.60	0.00	7.64	32.39	0	0.41	2.29	0.00	36.40	173.29

Tabela 4.39. Resumo dos resultados para a VM

Instâncias	Turno da Manhã						Turno da Tarde					
	GAP (%)			Tempo (s)			GAP (%)			Tempo (s)		
	Min	Méd	Máx	Min	Méd	Máx	Min	Méd	Máx	Min	Méd	Máx
S1_04.11.13	0	0.36	1.24	0.00	2.43	8.79	0	1.19	4.35	0.00	10.55	45.39
S2_06.01.14	0	0.33	1.12	0.00	3.78	16.97	0	1.07	6.06	0.00	6.43	24.12
S3_05.01.15	0	0.66	4.94	0.00	14.81	115.47	0	0	0	0.00	0.41	0.75
S4_02.03.15	0	0.36	1.53	0.00	29.01	171.51	0	0.04	0.26	0.00	49.78	297.14

Nestas tabelas, é possível observar que as heurísticas desenvolvidas, para as diferentes versões do problema em estudo, obtêm bons resultados e, ao contrário dos modelos matemáticos, obtêm boas soluções em pouco tempo.

Analisando o tempo computacional para as quatro instâncias, é possível observar que a instância S4_02.03.15 é aquela que, independentemente da versão e do turno considerado, apresenta tempos computacionais mais elevados. Recordando o número de cirurgias em lista de espera para cada instância, apresentado anteriormente na Tabela 3.1, é possível notar que esta instância é a que apresenta um maior número de cirurgias em lista de espera. Assim, na heurística de melhoramento, ao executar as vizinhanças que implicam trocas de cirurgias marcadas com cirurgias em lista de espera, esta instância apresenta um tempo computacional superior, devido à diversidade de trocas possíveis.

Comparando as três versões do problema, não é possível concluir que uma é melhor do que outra, uma vez que, em média, os GAPs obtidos não variam muito e a VA inclui os dois turnos, enquanto que a VC e a VM não. Mas, comparando a VC com a VM, é possível perceber que a VC-TM aparenta obter melhores GAPs médios e máximos, comparativamente à VM-TM, e os tempos computacionais são, geralmente, inferiores. Ou seja, realizando apenas a HC2+HM para a VC-TM, obtêm-se melhores resultados do que a HC1+HM e a HC2+HM para a VM-TM, e o tempo é inferior, como já se esperava, uma vez que se executa apenas uma heurística.

Comparando a VC-TT com a VM-TT, é executada a mesma heurística (HC2+HM), mas os resultados obtidos são diferentes, uma vez que a lista de espera no momento da execução é diferente (depende das cirurgias agendadas no turno da manhã), levando a que a heurística tenha comportamentos diferentes, tanto a nível de desvio à solução ótima, como no que respeita a tempos computacionais, não sendo conclusivo que uma versão obtenha sempre melhores resultados do que a outra.

Capítulo 5

Análise dos Resultados

No presente capítulo, com base nos resultados computacionais apresentados no capítulo anterior, é realizada uma análise dos resultados. Assim, começa-se por analisar os resultados através de indicadores de produtividade que avaliam a qualidade das soluções do ponto de vista da performance do bloco operatório. Seguidamente, são realizadas comparações entre as soluções obtidas, com as heurísticas desenvolvidas, e o registo do hospital em estudo para o agendamento cirúrgico da semana considerada. Posteriormente, e uma vez que as durações das cirurgias são estocásticas, é realizada uma simulação da agenda cirúrgica semanal, obtida com as heurísticas desenvolvidas, substituindo as durações estimadas pelas durações reais presentes no registo do hospital em estudo. Por fim, na última secção, encontram-se algumas conclusões da análise realizada.

5.1. Indicadores de produtividade

Com o objetivo de analisar a performance do bloco operatório, relativa à ocupação das salas em estudo, são apresentados, na Tabela 5.1, três indicadores para as quatro instâncias consideradas, dependendo da versão do problema considerada. Os indicadores %OcupSemTL, %OcupComTL e %TLivre representam, em média, a percentagem de ocupação dos blocos de tempo sem considerar o tempo de limpeza, a percentagem de ocupação dos blocos de tempo considerando o tempo de limpeza e a percentagem de tempo em que os blocos de tempo estão desocupados, respetivamente.

Tabela 5.1. Performance do bloco operatório referente à sua ocupação

	S1_04.11.13			S2_06.01.14			S3_05.01.15			S4_02.03.15		
	VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM
%OcupSemTL	76.9	65.2	69.6	78.3	66.4	70.9	72.8	61.9	71.7	72.0	63.0	68.9
%OcupComTL	98.5	99.4	98.7	98.5	99.2	98.9	99.1	99.5	98.9	99.0	99.5	99.3
%TLivre	1.5	0.6	1.3	1.5	0.8	1.1	0.9	0.5	1.1	1.0	0.5	0.7

Pode verificar-se que, contabilizando o tempo total da duração das cirurgias, os pacientes ocupam, em média, 70% das capacidades totais das salas do bloco operatório. Contabilizando o tempo total da duração das cirurgias e o respetivo tempo de limpeza, a percentagem de ocupação das salas aproxima-se dos 100%, sendo sempre maior ou igual a 98.5%, para todas as versões e instâncias consideradas. Logo, a percentagem de tempo livre de cada sala é, em média, inferior a 1.5%.

É também possível observar que, considerando a ocupação das salas sem os tempos de limpeza, as soluções obtidas com a VC e a VM têm, em média, uma menor percentagem de ocupação comparativamente às soluções obtidas com a VA. Tal acontece porque, nos turnos da tarde da VC e da VM, é maximizado o número de cirurgias agendadas. Assim, nestas duas versões são agendadas mais

cirurgias, cada uma com uma menor duração estimada, e, como são agendadas mais cirurgias, o tempo de limpeza será superior nestas duas versões.

Portanto, após a análise da performance do bloco operatório referente à sua ocupação, é possível afirmar que as heurísticas desenvolvidas permitem encontrar soluções que promovem uma boa ocupação das salas do bloco operatório, permitindo uma boa utilização deste recurso.

Para avaliar a qualidade do acesso para cada uma das versões, em relação aos pacientes marcados e aos pacientes que continuam em lista de espera, são apresentados quatro indicadores nas Tabelas 5.2 e 5.3. Na Tabela 5.2, os indicadores %CLE, nrDiasLE, nrDiasDL e %CFP dizem respeito às cirurgias marcadas e representam, respetivamente, a percentagem de cirurgias marcadas da lista de espera; o número médio de dias que as cirurgias marcadas estão em lista de espera; o número médio de dias que falta para as cirurgias marcadas excederem o tempo máximo de resposta (data limite); e a percentagem de cirurgias marcadas que excedem o tempo máximo de resposta (fora de prazo). Na Tabela 5.3, os indicadores são semelhantes aos indicadores apresentados na Tabela 5.2, porém dizem respeito às cirurgias que não são marcadas.

Tabela 5.2. Informação referente às cirurgias marcadas

	S1_04.11.13			S2_06.01.14			S3_05.01.15			S4_02.03.15		
	VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM
%CLE	8.9	14.0	11.8	8.9	14.4	12.1	5.3	7.5	5.4	6.2	8.4	6.9
nrDiasLE	337.3	41.5	156.5	313.7	39.4	152.6	252.9	52.5	220.4	262.2	57.6	187.2
nrDiasDL	-125.2	215.8	72.4	-104.8	216.5	77.9	-70.6	200.1	-58.5	-66.9	198.8	21.1
%CFP	87.9	2.3	40.2	86.6	1.6	39.6	90.0	3.1	86.6	88.9	3.5	61.8

Tabela 5.3. Informação referente às cirurgias não marcadas

	S1_04.11.13			S2_06.01.14			S3_05.01.15			S4_02.03.15		
	VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM
%CLE	91.1	86.0	88.2	91.1	85.6	87.9	94.7	92.5	94.6	93.8	91.6	93.1
nrDiasLE	116.1	151.1	133.0	112.5	145.7	127.3	120.2	133.2	120.5	117.5	132.8	122.0
nrDiasDL	149.7	110.6	132.5	153.1	115.6	137.3	142.7	125.9	142.3	146.9	127.7	142.1
%CFP	7.4	16.6	11.1	6.9	16.0	10.4	9.8	14.9	9.9	8.7	14.6	10.1

Na Tabela 5.2, é possível observar que as soluções obtidas para a VA apresentam uma menor percentagem de cirurgias marcadas do que as versões VC e VM, isto é, a agenda cirúrgica semanal possui menos cirurgias. Tal acontece devido ao objetivo dos turnos da tarde da VC e VM ser maximizar o número de cirurgias realizadas, como já referido anteriormente.

Devido ao facto de a VA selecionar os pacientes, que estão há mais tempo na lista de espera, considerando a sua prioridade, as cirurgias escolhidas para marcação apresentam um número de dias em lista de espera bastante elevado, principalmente para a instância S1_04.11.13, em que as cirurgias marcadas encontram-se em lista de espera, em média, há 337 dias. Pela mesma razão, e uma vez que existem, em lista de espera, bastantes cirurgias fora de prazo, o número de dias até à data limite das cirurgias marcadas, em média, para a VA é negativo e, das cirurgias marcadas, a percentagem de cirurgias fora de prazo é bastante elevada, isto é, mais de 86% das cirurgias marcadas já deviam ter sido realizadas, de acordo com a sua prioridade e a data de entrada na lista de espera.

Pelo contrário, para a VC, os pacientes foram selecionados pela ordem inversa de entrada na lista de espera, apresentando por isso as cirurgias marcadas, em média, um número de dias em lista de espera bastante reduzido, um número de dias até à data limite elevado e uma percentagem de cirurgias marcadas fora de prazo muito reduzida.

As soluções obtidas com a VM, e uma vez que esta versão é um meio termo entre as duas versões anteriores, apresentam valores intermédios entre os valores obtidos para a VA e para a VC, para os quatro indicadores.

Na Tabela 5.3, é possível observar os indicadores referentes às cirurgias não marcadas, que têm a lógica contrária aos indicadores das cirurgias marcadas. É interessante notar a diminuição da percentagem de cirurgias fora de prazo, que a VA permite, na lista de espera, comparativamente à percentagem de cirurgias fora de prazo apresentada na Tabela 3.3 na Secção 3.2. É também notável a existência de uma diferença considerável entre os indicadores, dependendo da versão do problema que se considera. Optando pela VA, consegue-se uma redução elevada no tempo médio de espera por uma cirurgia bem como no número de cirurgias fora de prazo. Por outro lado, a VC promove uma maior desigualdade no acesso, e a VM consegue um balanço intermédio, mas aproximando-se mais da VA.

Portanto, com a análise das duas tabelas anteriores, é possível observar que as heurísticas desenvolvidas para cada versão seguem os respetivos critérios, enunciados anteriormente na descrição do problema. As heurísticas para a VA promovem a equidade no acesso, selecionando os pacientes que estão há mais tempo na lista de espera e considerando a sua prioridade. As heurísticas para a VC promovem a marcação dos pacientes pela ordem inversa de entrada na lista de espera. E, por fim, as heurísticas para a VM promovem uma escolha dos pacientes a operar, de acordo com um misto dos critérios das duas versões anteriores.

Na Tabela 5.4, são analisadas informações relevantes sobre os cirurgiões, como a percentagem de cirurgiões sem cirurgias agendadas, durante a semana considerada, e, dos cirurgiões com pelo menos uma cirurgia agendada, o tempo em cirurgia, diário e semanal, mínimo, médio e máximo, apurado, para cada uma das quatro semanas consideradas.

Tabela 5.4. Informação referente aos cirurgiões

		S1_04.11.13			S2_06.01.14			S3_05.01.15			S4_02.03.15		
		VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM
%SemCirurgias		34	17	16	51	40	39	48	48	47	50	52	50
Tempo diário em cirurgia (minutos)	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Méd	33	18	21	34	19	22	18	12	17	23	17	21
	Máx	341	185	321	352	233	326	215	156	180	279	150	282
Tempo semanal em cirurgia (minutos)	Min	12	5	4	7	6	6	4	5	4	9	5	8
	Méd	166	91	108	173	99	114	91	63	87	116	89	108
	Máx	1006	382	581	1198	433	526	525	373	503	782	282	589

Devido ao elevado número de cirurgiões e de cirurgias em lista de espera, e pelo facto dos procedimentos mais vezes realizados serem alocados aos mesmos cirurgiões, a percentagem de cirurgiões sem cirurgias agendadas para a semana de planeamento pode ser elevada, chegando aos 51% na VA, para a instância S2_06.01.14.

Alguns cirurgiões, com cirurgias agendadas, podem não ter cirurgias em determinados dias e, por isso, o tempo diário mínimo em cirurgia é de 0 minutos. Em média, o tempo diário em cirurgia é cerca de 20 minutos e o tempo semanal em cirurgia é cerca de 2 horas, aproximadamente.

Para a VA, em que foi considerado como tempo máximo em cirurgia, diário e semanal, 360 e 1512 minutos, respetivamente, é possível observar que nenhum cirurgião excedeu esse valor. É interessante notar que, mesmo não considerando estas restrições para os turnos da tarde da VC e da VM, nenhum cirurgião excedeu estes valores para as três versões e instâncias consideradas.

5.2. Comparação com o registo do hospital em estudo

De forma a comparar as soluções obtidas, pelas três versões do problema, com o registo do hospital em estudo, para a agenda cirúrgica das semanas consideradas, foi analisado o número de cirurgias realizadas pelo hospital e agendadas pelas três versões das heurísticas, para as 4 semanas consideradas, estando presentes estes valores na Figura 5.1. Nesta figura, pode notar-se que existe uma grande diferença entre o número de cirurgias realizadas pelo hospital e o número de cirurgias agendadas com qualquer uma das versões do problema considerada. Das três versões, a VA é aquela onde o número de cirurgias marcadas é mais próximo do número de cirurgias realizadas no hospital em estudo.

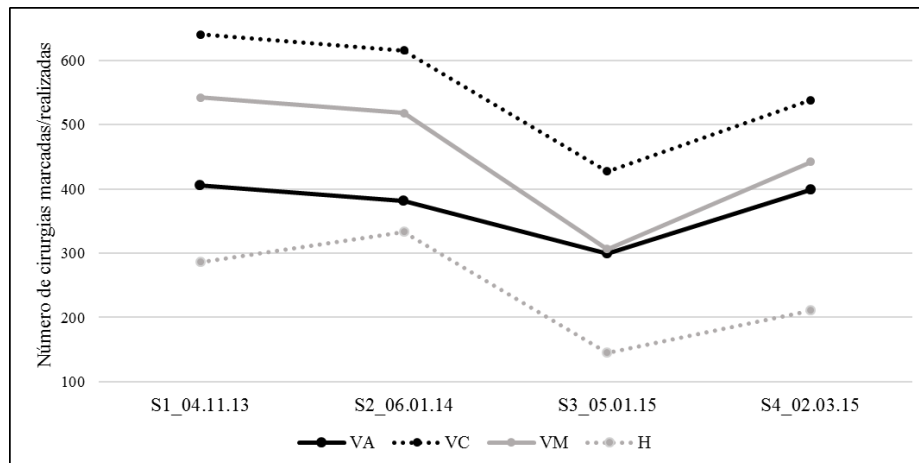


Figura 5.1. Número de cirurgias marcadas pelas heurísticas (VA, VC e VM) e número de cirurgias realizadas pelo hospital (H) para as quatro semanas consideradas

Na Tabela 5.5, é possível observar o número de cirurgias marcadas pelas heurísticas e o número de cirurgias realizadas pelo hospital em estudo, para cada nível de prioridade e para cada semana de planeamento. A VA é a versão que marca mais cirurgias de prioridade mais elevada, seguindo-se a VM. A VC é aquela que marca menos cirurgias de prioridade mais elevada, e tal acontece porque esta versão agenda os pacientes de acordo com a ordem inversa de entrada na lista de espera. Assim, e uma vez que as cirurgias de prioridade mais elevada são menos comuns, as cirurgias de prioridade 1 são as mais frequentes para entrar em lista de espera, logo têm uma maior probabilidade de serem agendadas ao invés das cirurgias com prioridade mais elevada.

O hospital em estudo, para as semanas consideradas, realizou mais cirurgias de prioridade mais elevada do que a VC, mas não realizou tantas cirurgias como as marcadas pela VA.

Tabela 5.5. Comparação do número de cirurgias realizadas pelo hospital (H) com o número de cirurgias agendadas pelas heurísticas (VA, VC e VM)

		S1_04.11.13				S2_06.01.14				S3_05.01.15				S4_02.03.15			
		VA	VC	VM	H	VA	VC	VM	H	VA	VC	VM	H	VA	VC	VM	H
Prioridade	1	303	603	444	244	279	575	427	255	187	394	197	103	268	505	322	161
	2	67	30	66	24	67	34	64	52	61	23	58	27	83	25	77	35
	3	15	4	11	10	12	4	9	7	16	7	16	9	19	5	18	11
	4 ²	21	3	21	8	23	2	18	19	35	3	35	6	28	3	25	4
Total		406	640	542	286	381	615	518	333	299	427	306	145	398	538	442	211

² Note-se que, como referido anteriormente, apenas as cirurgias de prioridade 4 com data limite durante o horizonte de planeamento são obrigatoriamente agendadas. Uma vez que, nas instâncias consideradas, a maioria das cirurgias de prioridade 4 encontram-se fora de prazo, o número de cirurgias agendadas de prioridade 4 pode ser diferente dependendo da versão do problema considerada.

Para além de ser importante comparar o número de cirurgias realizadas no hospital com as cirurgias agendadas pelas heurísticas, é interessante observar quantas cirurgias existem em comum. Assim, na Tabela 5.6, é possível observar dois indicadores referentes às cirurgias em comum entre as cirurgias marcadas pelas heurísticas e as cirurgias realizadas pelo hospital. Os dois indicadores nrCcomum e %Ccomum correspondem ao número de cirurgias em comum entre cada versão e para cada instância, comparativamente ao registado pelo hospital, e a percentagem mínima, média e máxima de cirurgias em comum, para as 11 especialidades cirúrgicas, respetivamente.

A VC é a versão que apresenta um maior número de cirurgias em comum, para as quatro instâncias consideradas, comparativamente ao registo do hospital, o que assinala a ideia inicial que a VC é a versão mais semelhante à escolha dos pacientes a agendar pelo hospital. Para as instâncias S1_04.11.13 e S2_06.01.14, o número de cirurgias em comum na agenda cirúrgica semanal é superior às outras duas instâncias.

Considerando as especialidades, separadamente, existem especialidades que não apresentam cirurgias marcadas em comum com o registo do hospital, mas existe pelo menos uma especialidade que apresenta 57.1% de cirurgias em comum com o registado pelo hospital, observado na instância S2_06.01.14 para a VC. Em média, a percentagem de cirurgias em comum para cada especialidade é de 7%.

Tabela 5.6. Informação referente às cirurgias em comum entre as cirurgias marcadas pelas heurísticas e as cirurgias realizadas pelo hospital

		S1_04.11.13			S2_06.01.14			S3_05.01.15			S4_02.03.15		
		VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM
nrCcomum		17	75	54	22	68	51	6	15	7	12	28	18
%Ccomum	Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Méd	5.7	9.0	8.2	8.4	13.5	12.6	4.4	5.6	3.7	4.9	6.9	5.7
	Máx	17.6	20.9	20.2	25.0	57.1	42.9	33.3	36.4	18.2	20.0	33.3	30.0

Na Figura 5.2, encontram-se representadas as percentagens de cirurgias em comum para a instância S2_06.01.14, para cada uma das especialidades. Em geral, para esta instância, a percentagem de cirurgias em comum é superior para a VC, exceto para algumas especialidades onde a VC não é a que apresenta uma maior percentagem de cirurgias em comum, mas não sendo significativa a diferença de percentagens nessas especialidades para as três versões (CPD, GIN, ORTa, ORTb e OTO).

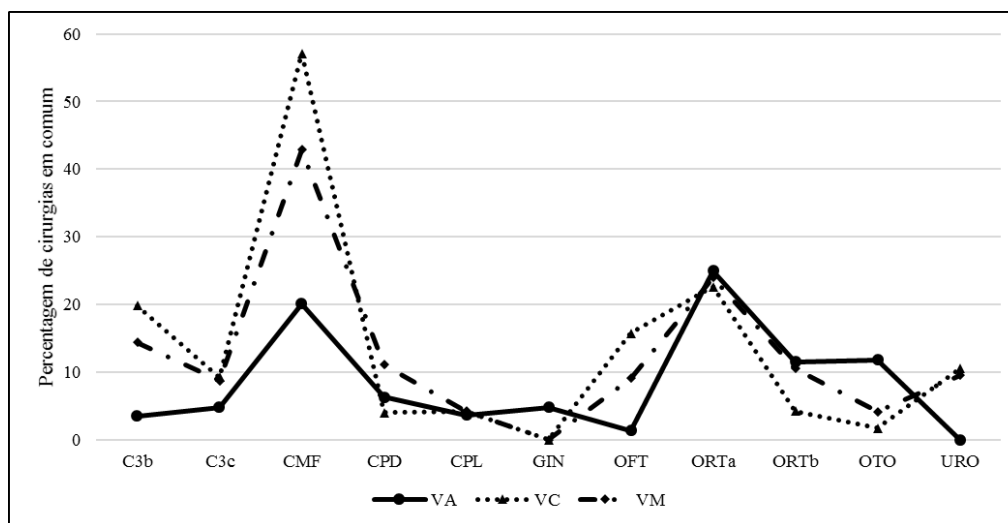


Figura 5.2. Percentagem de cirurgias em comum com cirurgias realizadas pelo hospital para as 11 especialidades cirúrgicas para a instância S2_06.01.14

5.3. Simulação com durações reais

Foram utilizadas as durações reais das cirurgias agendadas, disponíveis no registo do hospital, para fazer uma simulação que permite compreender a robustez das agendas cirúrgicas propostas pelas heurísticas. Na agenda cirúrgica semanal obtida pelas heurísticas, foram consideradas as durações reais das cirurgias, de forma a perceber se, caso a solução obtida fosse aplicada na realidade, o recurso tempo disponível das salas seria suficiente.

Na Tabela 5.7, encontra-se informação sobre o número de cirurgias marcadas em cada instância, para cada versão do problema (nrCM), o número de cirurgias marcadas que se encontram presentes no registo do hospital (nrCR) e a sua correspondente percentagem (%CR). É possível observar que, como verificado anteriormente, a VC é aquela que tem uma maior percentagem de cirurgias em comum com as soluções obtidas pelas heurísticas e, neste caso, também obtém uma maior percentagem de cirurgias marcadas presentes no registo disponível do hospital. Uma vez que o registo de cirurgias realizadas data de janeiro de 2013 a maio de 2015, existe uma maior percentagem de cirurgias em comum para as primeiras duas instâncias (S1_04.11.13 e S2_06.01.14) e um número mais reduzido para as duas últimas (S3_05.01.15 e S4_02.03.15).

Tabela 5.7. Cirurgias agendadas que se encontram no registo do hospital em estudo

	S1_04.11.13			S2_06.01.14			S3_05.01.15			S4_02.03.15		
	VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM
nrCM	406	640	542	381	615	518	299	427	306	398	538	442
nrCR	129	430	286	141	406	279	48	104	50	62	150	86
%CR	31.8	67.2	52.8	37.0	66.0	53.9	16.1	24.4	16.3	15.6	27.9	19.5

Para perceber que alterações existem entre os tempos utilizados nas heurísticas (médias por procedimento) e os tempos efetivamente ocorridos, na Tabela 5.8 pode-se observar, para o tempo em cirurgia e para o tempo total do paciente em sala, o número de cirurgias em que o tempo real é inferior (nrCRInf), igual (nrCRIgual) e superior (nrCRSup) ao estimado, e a percentagem média da alteração que os tempos sofreram (%Alt).

Tabela 5.8. Alterações nos tempos das cirurgias e nos tempos totais dos pacientes na sala do bloco operatório

		S1_04.11.13			S2_06.01.14			S3_05.01.15			S4_02.03.15		
		VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM
Tempo em Cirurgia	nrCRInf	58	236	154	65	217	138	16	44	17	22	59	24
	nrCRIgual	7	35	24	7	26	19	3	15	3	6	16	9
	nrCRSup	64	159	108	69	163	122	29	45	30	34	75	53
	%Alt	40.6	27.8	19.6	32.2	12.0	21.7	97.2	29.8	102.0	132.3	55.9	128.0
Tempo Total	nrCRInf	61	242	160	72	234	152	21	56	23	30	72	32
	nrCRIgual	5	12	9	1	13	8	1	3	1	2	6	4
	nrCRSup	63	176	117	68	159	119	26	45	26	30	72	50
	%Alt	23.9	7.0	7.3	24.7	0.9	8.7	60.0	15.6	62.7	70.0	34.2	72.6

É interessante notar que o número de cirurgias em que a duração estimada é superior à real não é consistentemente superior ao número de cirurgias em que a duração estimada é inferior à real, mas a percentagem média de alteração é sempre positiva, chegando a ser 132.3%, isto é, para a instância S4_02.03.15 na VA, em média, as cirurgias marcadas com um determinado tempo de cirurgia, na realidade duraram mais 32.3%. Tal indica que, apesar de muitas das cirurgias terem sido estimadas

com uma duração inferior à real, quando as cirurgias demoraram mais a realizar do que o previsto a percentagem desse excesso foi bastante superior.

Comparando as diferenças entre os tempos que demoram a realizar os procedimentos cirúrgicos e o tempo total do paciente na sala, é interessante notar que, apesar de, em média, a percentagem de alteração ser bastante elevada no tempo em cirurgia, para o tempo total do paciente em sala não existe uma percentagem tão elevada. Logo, apesar de, em média, os procedimentos cirúrgicos serem mais longos, os pacientes não ficam muito mais tempo em sala do que o previsto.

As percentagens médias de alteração são bastante mais elevadas para as duas últimas instâncias quando comparadas com as duas instâncias iniciais. Tal pode acontecer, ou porque o número de cirurgias comparado é inferior, podendo não ser um bom indicativo da realidade, ou porque as durações estimadas, utilizando dados desde 2013, podem não representar bem as durações reais, para datas mais recentes.

Na Tabela 5.9, e terminando esta análise, estão representados, para cada instância, o número de blocos disponíveis para marcação de cirurgias (nrB) e o número de blocos em que a ocupação diminui (nrBD), aumenta (nrBA) e ultrapassa a capacidade máxima do bloco (nrBU). Nestas tabelas, também é possível observar três indicadores de produtividade, referentes ao bloco operatório, utilizando os tempos ocorridos presentes nos registos do hospital onde %OcupSemTL, %OcupComTL e %TLivre representam, em média, a percentagem de ocupação dos blocos de tempo sem considerar o tempo de limpeza, a percentagem de ocupação dos blocos de tempo considerando o tempo de limpeza e a percentagem de tempo em que os blocos de tempo estão desocupados, respetivamente.

Nesta tabela, é possível observar que, para todas as versões e para todas as instâncias, exceto para a VC, na instância S2_06.01.14, o número de blocos de tempo que tiveram uma ocupação superior, com a simulação, foi sempre superior ao número de blocos de tempo que tiveram uma ocupação inferior. Dos blocos de tempo em que a ocupação aumentou, com a simulação, a maioria dos blocos passou a ter uma ocupação superior à ocupação máxima pré-definida, isto é, com as durações reais das cirurgias, a agenda cirúrgica semanal não permite realizar todas as cirurgias marcadas para um bloco de tempo, no tempo máximo estabelecido.

Pode verificar-se que, contabilizando o tempo total da duração das cirurgias, os pacientes ocupam, em média, 75% das capacidades totais das salas do bloco operatório. Contabilizando o tempo total da duração das cirurgias e os tempos de limpeza, a percentagem de ocupação das salas é, em média, sempre superior a 100%, exceto para a instância S2_06.01.14. Logo, a percentagem de tempo livre de cada sala é, em média, negativo, uma vez que o tempo disponível em cada sala, em média, não chega para realizar todas as cirurgias marcadas.

Tabela 5.9. Informação referente aos blocos de tempos utilizando as durações reais presentes nos registos

	S1_04.11.13			S2_06.01.14			S3_05.01.15			S4_02.03.15		
	VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM
nrB	84			84			52			67		
nrBD	31	39	35	34	40	39	12	18	13	18	18	14
nrBA	35	44	37	35	38	41	17	19	16	22	32	28
nrBU	31	42	34	33	34	39	15	18	15	21	32	27
%OcupSemTL	80.0	67.8	71.7	82.6	66.8	73.6	78.1	64.2	77.0	78.3	69.2	76.5
%OcupComTL	101.6	102.1	100.8	102.8	99.6	101.5	104.4	101.9	104.2	105.3	105.7	106.9
%TLivre	-1.6	-2.1	-0.8	-2.8	0.4	-1.5	-4.4	-1.9	-4.2	-5.3	-5.7	-6.9

De maneira a melhorar os resultados obtidos, é necessário estimar melhor a duração das cirurgias, de forma a obter-se uma agenda cirúrgica robusta e que não contenha tantos blocos de tempo em que,

quando posto em prática, seja necessário cancelar cirurgias porque a capacidade dos blocos de tempo foi ultrapassada.

Assim, foi feito um teste alterando a duração das cirurgias e executando as heurísticas desenvolvidas, de modo a obter uma nova agenda cirúrgica semanal, para as 3 versões estudadas e para as 4 instâncias consideradas. Uma vez que a %Alt obtida para a duração do tempo total dos pacientes em sala, presente na Tabela 5.8, foi, em média, 32.3%, foi considerado que a duração do tempo total dos pacientes em sala, em vez de ser a média por procedimento cirúrgico, é a média a multiplicar por 1.323 (média acrescida em 32.3%). Nos resultados anteriores, foi observado que a %Alt da duração das cirurgias é superior à %Alt da duração do tempo total, mas, de forma a não serem obtidas durações de cirurgia superiores às durações totais dos pacientes em sala, considerou-se também, para esta duração, a média acrescida em 32.3%.

Como a duração das cirurgias foi aumentada, é previsto que o número de cirurgias marcadas na nova agenda cirúrgica semanal seja inferior ao número obtido anteriormente, quando considerada a duração média por procedimento. Na Figura 5.3, é possível observar, para cada versão e para cada instância, o número de cirurgias marcadas na agenda cirúrgica semanal obtida anteriormente, o número de cirurgias realizadas pelo hospital nas semanas consideradas e o número de cirurgias marcadas pela nova agenda cirúrgica semanal. Como previsto, o número de cirurgias marcadas pelas novas soluções é inferior ao anteriormente obtido, aproximando-se assim do número de cirurgias realizadas pelo hospital nas semanas consideradas. A VA é aquela que mais se aproxima do número de cirurgias realizadas pelo hospital nas semanas consideradas, chegando a marcar menos cirurgias do que as realizadas na instância S2_06.01.14.

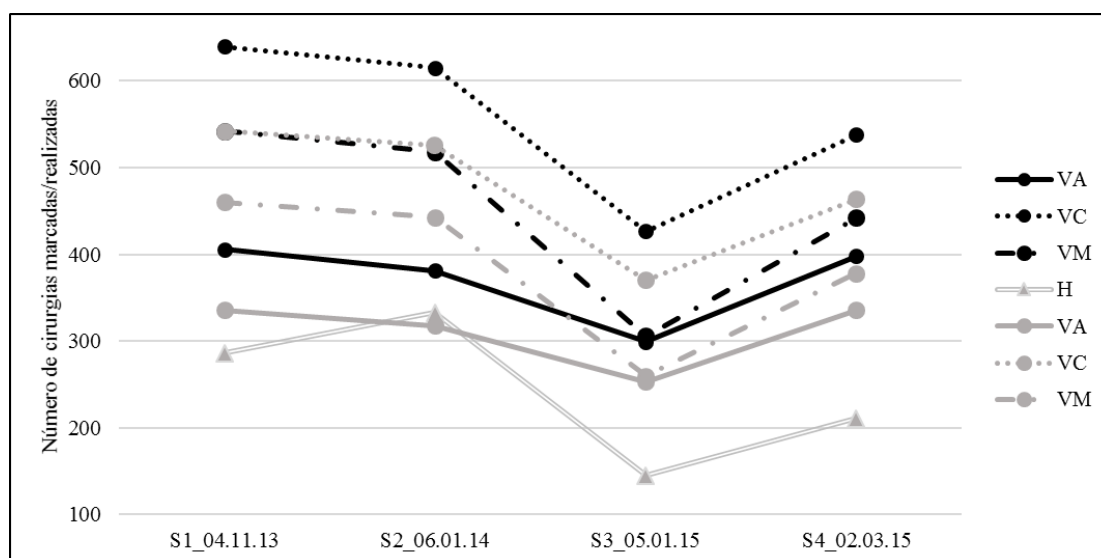


Figura 5.3. Número de cirurgias marcadas pela agenda cirúrgica semanal anterior (preto), número de cirurgias marcadas pela nova agenda cirúrgica semanal (cinzento) e número de cirurgias realizadas no hospital (H)

Na Figura 5.4, está apresentada a diferença entre o número de blocos que excederam a capacidade anteriormente e o número de blocos que excederam a capacidade com as novas durações consideradas. É possível observar que, mesmo considerando as novas durações para as cirurgias, para todas as instâncias e versões consideradas, continuam a existir blocos de tempo que ultrapassam a sua capacidade, quando são consideradas as durações reais das cirurgias presentes no registo do hospital. Mas esse número é inferior, comparativamente à anterior, tornando esta agenda cirúrgica melhor, do ponto de vista do cumprimento do planeamento.

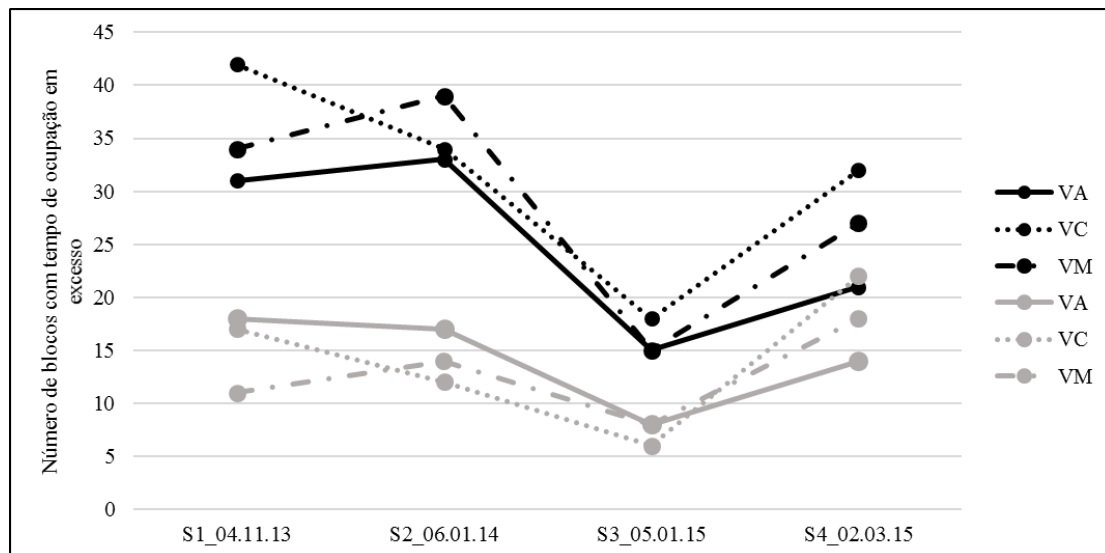


Figura 5.4. Número de blocos com tempo de ocupação em excesso para a nova agenda cirúrgica semanal (cinzento) e para a antiga (preto)

Por fim, e analisando a performance do bloco operatório, quando consideradas as durações reais das cirurgias, para esta nova agenda cirúrgica semanal, obtém-se os resultados presentes na Tabela 5.10. Nesta tabela, é possível observar que a percentagem média de ocupação dos blocos de tempo sem considerar o tempo de limpeza (%OcupSemTL) e a percentagem média de ocupação dos blocos de tempo considerando o tempo de limpeza (%OcupComTL), são inferiores aos observados na Tabela 5.9. Ou seja, para estas soluções, e como foi considerada uma maior duração das cirurgias, quando se substitui a duração estimada pela duração real a percentagem de ocupação dos blocos de tempo, em média, é inferior. Para as instâncias S1_04.11.13 e S2_06.01.14, as agendas cirúrgicas semanais obtêm, em média, um tempo livre considerável, chegando aos 10.9% para a instância S2_06.01.14 para a VC, o que pode evidenciar que a capacidade das salas do bloco operatório pode vir a ser pouco utilizada. Por outro lado, para a instância S4_02.03.15, continua a observar-se, em média, uma percentagem de ocupação dos blocos de tempo superior a 100%, ou seja, ultrapassando a sua capacidade máxima, tendo por isso uma percentagem média de tempo livre (%TLivre) negativa, para as três versões desta instância.

Tabela 5.10. Performance do bloco operatório referente à sua ocupação considerando a duração real das cirurgias, presente no registo do hospital

	S1_04.11.13			S2_06.01.14			S3_05.01.15			S4_02.03.15		
	VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM	VA	VC	VM
%OcupSemTL	76.2	61.7	66.6	76.6	70.0	67.6	77.3	65.3	76.3	78.1	70.0	75.6
%OcupComTL	94.2	90.7	91.2	93.4	89.1	91.4	99.5	98.0	99.6	100.8	101.4	101.4
%TLivre	5.8	9.3	8.8	6.6	10.9	8.6	0.5	2.0	0.4	-0.8	-1.4	-1.4

5.4. Conclusões

Para os resultados computacionais apresentados no capítulo anterior, a análise realizada neste capítulo mostra que as heurísticas desenvolvidas permitem obter uma agenda cirúrgica semanal com uma boa performance ao nível de ocupação das salas do bloco operatório, e cada versão das heurísticas tem um desempenho adequado, consoante o seu objetivo na seleção dos pacientes a marcar.

Ao comparar as cirurgias marcadas pelas heurísticas com as cirurgias realizadas pelo hospital, observou-se que a VC é aquela que mais se aproxima das práticas do hospital, nas semanas consideradas.

Substituindo as durações estimadas pelas durações reais presentes no registo do hospital em estudo, observou-se que muitas das cirurgias excederam a duração estimada, levando a que as cirurgias marcadas para um bloco de tempo, na realidade não poderiam ser todas realizadas, uma vez que excediam a sua capacidade. Este problema leva a que muitas vezes, para as agendas cirúrgicas semanais obtidas, as cirurgias teriam de ser atrasadas ou canceladas, para cumprir o horário de funcionamento do bloco operatório.

Aumentando a duração estimada das cirurgias, continuaram a existir blocos de tempo em que a sua capacidade máxima foi ultrapassada, e outros blocos de tempo ficaram com uma ocupação muito inferior à sua capacidade máxima. Assim, o facto de as durações das cirurgias serem estocásticas, introduz incerteza à agenda cirúrgica semanal. O grande objetivo é reduzir a incerteza, estimando da melhor forma possível as durações das cirurgias e tentando prever a existência de *outliers*.

Capítulo 6

Interface

No presente capítulo, é realizada uma breve descrição do funcionamento da interface criada, que permite a leitura da lista de espera e propõe uma agenda cirúrgica semanal. Assim, começa-se por explicar a leitura do ficheiro de dados. Posteriormente, é descrita a execução das heurísticas desenvolvidas. Por fim, é apresentada a visualização dos resultados obtidos, isto é, a agenda cirúrgica semanal proposta pelas heurísticas desenvolvidas.

6.1. Leitura dos dados

Ao abrir a interface denominada Marcação de Cirurgias, surge a janela apresentada na Figura 6.1. Esta janela encontra-se organizada em duas áreas. A área do lado esquerdo refere-se aos parâmetros que o utilizador deve selecionar para executar as heurísticas desenvolvidas, enquanto a área do lado direito mostrará a solução obtida pelas heurísticas desenvolvidas, para os parâmetros escolhidos.

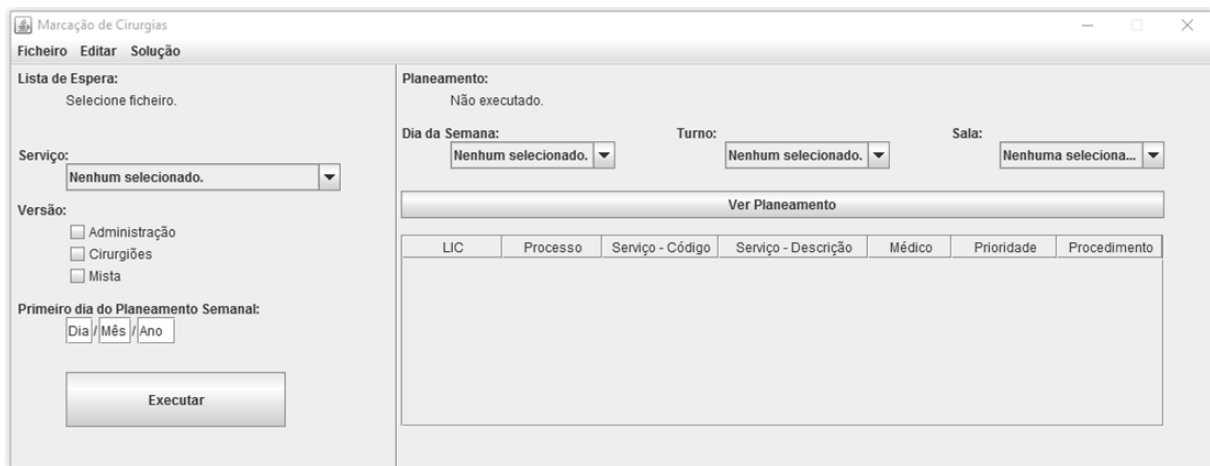


Figura 6.1. *Layout* da interface desenvolvida

É possível observar que ainda não existe uma lista de espera selecionada, nem um planeamento executado. Para abrir uma lista de espera, é necessário selecionar um ficheiro. Assim, carregando em Ficheiro, na barra do menu superior, e posteriormente em Abrir, surge uma caixa de diálogo para selecionar um ficheiro, como exibido na Figura 6.2. Para os dados do problema serem lidos corretamente, o ficheiro de dados tem de ser um ficheiro Excel (.xls ou .xlsx) e tem de ser composto por 3 folhas, como exibido na Figura 6.3.

Na primeira folha, encontra-se a lista de espera, onde cada linha está associada a uma cirurgia. Para cada cirurgia, é necessário estar registado o número associado da LIC (lista de inscritos para cirurgia); o número do processo do paciente; o código e a descrição do serviço a que pertence a cirurgia; o

número identificador do cirurgião que realizará a cirurgia; o dia, o mês e o ano em que a cirurgia entrou em lista de espera; a prioridade da cirurgia; e o código do procedimento. Estes dados têm de se encontrar por esta ordem, da coluna A até à coluna J, na primeira folha do ficheiro Excel.

Na segunda folha, encontra-se o MSS onde, cada sala referida na coluna A, para cada dia da semana associado às colunas B-F, e para cada turno (manhã e tarde, representados nas linhas 2-12 e 15-25, respetivamente), está associado o código do serviço afeto. Caso não esteja associado um serviço, é colocado o valor 0 na célula respetiva.

Na terceira folha, encontram-se as horas máximas de trabalho, em cirurgia, diárias e semanais, para cada cirurgião. Cada linha tem associado um cirurgião, identificado pelo respetivo número, cada coluna B-F contém a capacidade máxima, diária, de segunda-feira a sexta-feira, e a coluna G contém a capacidade máxima semanal.

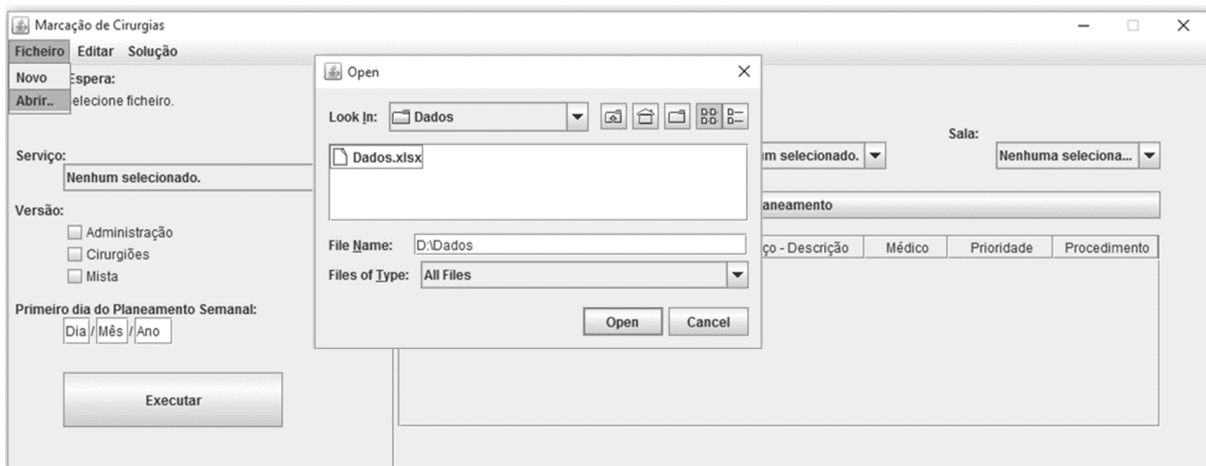


Figura 6.2. Caixa de diálogo para abrir um ficheiro de dados

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	LIC	Processo	Serviço	Serviço_D	Médico	Dia	Mês	Ano	Prioridade	Procedimento
2	164165	328338	201	CIRURGIA - 3C	98	29	3	2010	1	06.4
3	162327	1123638	201	CIRURGIA - 3C	125	12	3	2010	1	53.61
4	183371	567936	201	CIRURGIA - 3C	98	20	9	2010	1	06.4
5	191267	836388	201	CIRURGIA - 3C	98	26	11	2010	1	06.2
6	188827	646528	201	CIRURGIA - 3C	98	8	11	2010	1	06.4
7	198771	737032	201	CIRURGIA - 3C	98	7	2	2011	1	06.4
8	204289	1208216	201	CIRURGIA - 3C	125	29	3	2011	1	46.11
9	222727	791108	201	CIRURGIA - 3C	98	19	9	2011	1	06.4
10	210953	264830	201	CIRURGIA - 3C	27	24	5	2011	1	51.22
11	226097	1741404	201	CIRURGIA - 3C	125	18	10	2011	1	49.45
12	229967	225864	201	CIRURGIA - 3C	125	22	11	2011	1	51.23
13	231073	778186	201	CIRURGIA - 3C	125	12	12	2011	1	07.00

	A	B	C	D	E	F	G
1		2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	
2	1	308	206	308	206	0	M a n h ã
3	2	206	206	206	206	0	
4	3	208	203	208	210	0	
5	4	208	203	208	203	203	
6	5	204	204	204	204	201	
7	6	205	205	205	205	205	
8	7	0	0	0	0	0	
9	8	302	302	302	302	302	
10	9	201	201	201	201	201	
11	10	202	202	202	202	202	
12	11	211	210	204	204	302	

	A	B	C	D	E	F	G
1	Médico	Capacidade 2ª	Capacidade 3ª	Capacidade 4ª	Capacidade 5ª	Capacidade 6ª	Capacidade Semanal
2	1	360	360	360	360	360	1512
3	2	360	360	360	360	360	1512
4	3	360	360	360	360	360	1512
5	4	360	360	360	360	360	1512
6	5	360	360	360	360	360	1512
7	6	360	360	360	360	360	1512
8	7	360	360	360	360	360	1512
9	8	360	360	360	360	360	1512
10	9	360	360	360	360	360	1512
11	10	360	360	360	360	360	1512
12	11	360	360	360	360	360	1512

	A	B	C	D	E	F	G
15	1	0	0	0	0	0	T a r d e
16	2	206	0	206	0	206	
17	3	0	201	0	0	0	
18	4	208	203	208	203	208	
19	5	204	204	201	202	204	
20	6	205	205	205	205	205	
21	7	0	0	0	0	0	
22	8	202	202	308	302	0	
23	9	201	201	201	201	201	
24	10	210	210	202	210	202	
25	11	210	210	211	210	0	

Figura 6.3. Exemplo de um ficheiro de dados em formato Excel

Depois de seleccionar um ficheiro de dados, é necessário aguardar uns segundos até os dados serem lidos pelo programa desenvolvido. Uma vez carregados os dados, são apresentados na interface o número de cirurgias em lista de espera e o número de cirurgiões ativos, de acordo com ficheiro de dados, como representado na Figura 6.4. Neste exemplo, a instância utilizada (S1_04.11.13) contém 4574 cirurgias em lista de espera e 128 cirurgiões responsáveis pelas cirurgias.

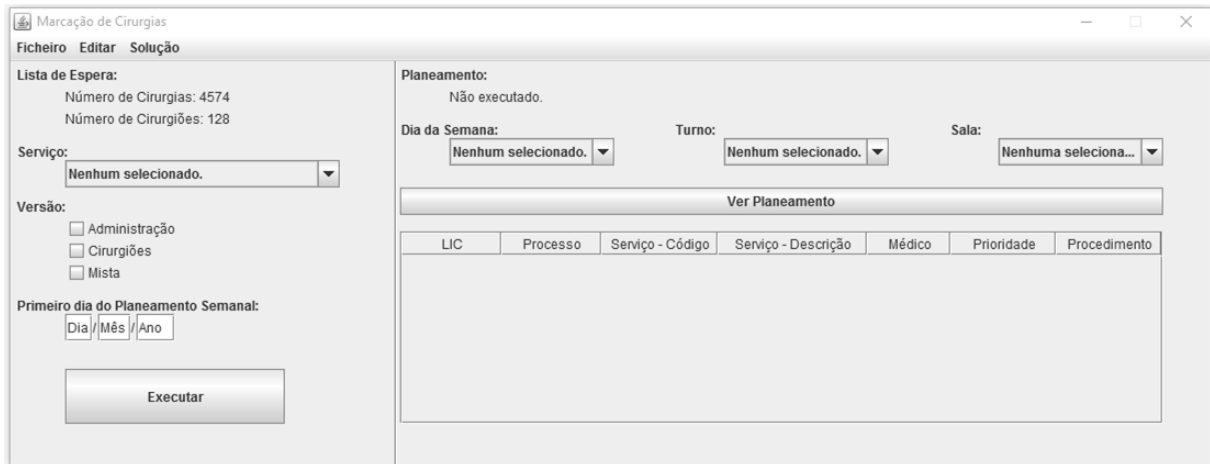


Figura 6.4. Layout da interface desenvolvida após leitura do ficheiro de dados

Para além dos dados inseridos pelo utilizador, para a execução das heurísticas são utilizadas estimativas do tempo da intervenção cirúrgica e do tempo total que o paciente deverá permanecer na sala, assim como o tempo médio de limpeza associado a cada serviço. Assim, foi desenvolvida a possibilidade de estes parâmetros do problema serem alterados pelo utilizador, sempre que necessário, depois da leitura dos dados e antes da execução das heurísticas. Para alterar estes parâmetros, é necessário seleccionar Editar, na barra do menu superior, e, posteriormente, escolher Durações das Cirurgias ou Tempos de Limpeza, como representado na Figura 6.5.



Figura 6.5. Editar parâmetros do problema

Para alterar a duração de cirurgias, é aberta uma caixa de diálogo como representado na Figura 6.6. Colocando o número da LIC da cirurgia e carregando em Ver Durações, observa-se a duração estimada da cirurgia e a duração total. Caso o utilizador queira alterar estes valores, o utilizador coloca os novos valores nos espaços indicados e carrega na opção Alterar, para que as alterações sejam consideradas.

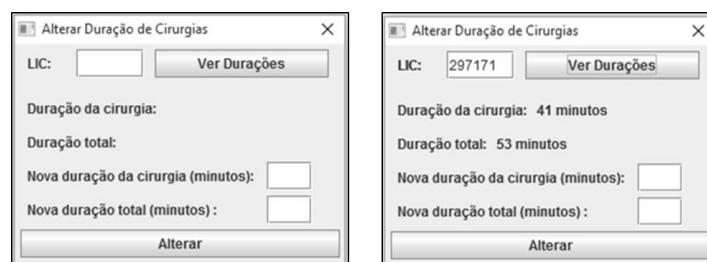


Figura 6.6. Caixa de diálogo para alterar duração de cirurgias

Para alterar o tempo de limpeza, é aberta uma caixa de diálogo como representado na Figura 6.7. Colocando o código do serviço que se pretende alterar e carregando na opção Ver Tempo de Limpeza, observa-se o tempo médio de limpeza em utilização. O utilizador pode alterar este valor, colocando o novo valor no espaço indicado e carregando na opção Alterar, para que a alteração seja considerada.

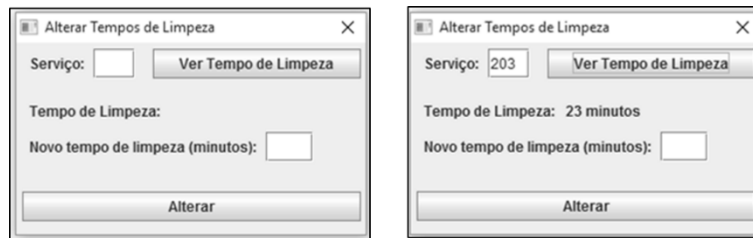


Figura 6.7. Caixa de diálogo para alterar tempos de limpeza

6.2. Execução das heurísticas desenvolvidas

Após a leitura dos dados e após a possível alteração dos tempos de limpeza e das durações das cirurgias, é necessário selecionar o serviço, a versão do problema e o primeiro dia do planeamento semanal para, posteriormente, executar a heurística desenvolvida, de acordo com os parâmetros introduzidos. Para escolher o serviço, basta selecionar, da lista disponível, o serviço para o qual se pretende obter o planeamento semanal, ou escolher a opção Todos de forma a obter um planeamento semanal para todos os serviços do bloco operatório. Das três versões disponíveis para o problema, o utilizador tem de selecionar uma. É ainda necessário introduzir o dia, o mês e o ano correspondente ao primeiro dia do planeamento semanal, isto é, o dia correspondente à segunda-feira da semana para a qual se pretende obter a agenda cirúrgica. Um exemplo da seleção de todos estes parâmetros encontra-se visível na Figura 6.8.



Figura 6.8. Layout da interface desenvolvida após selecionados todos os parâmetros do problema

Depois de selecionados todos os parâmetros, é necessário carregar na opção Executar e aguardar até os algoritmos desenvolvidos obterem o planeamento desejável, de acordo com os dados introduzidos pelo utilizador. O tempo que o utilizador tem de aguardar até obter o plano depende do serviço requerido, do tamanho da lista de espera, e de outras variáveis, podendo este tempo variar de breves segundos a alguns minutos. Depois de executadas as heurísticas, tem-se uma agenda cirúrgica semanal e obtém-se na interface o número de cirurgias marcadas, como exemplificado na Figura 6.9.

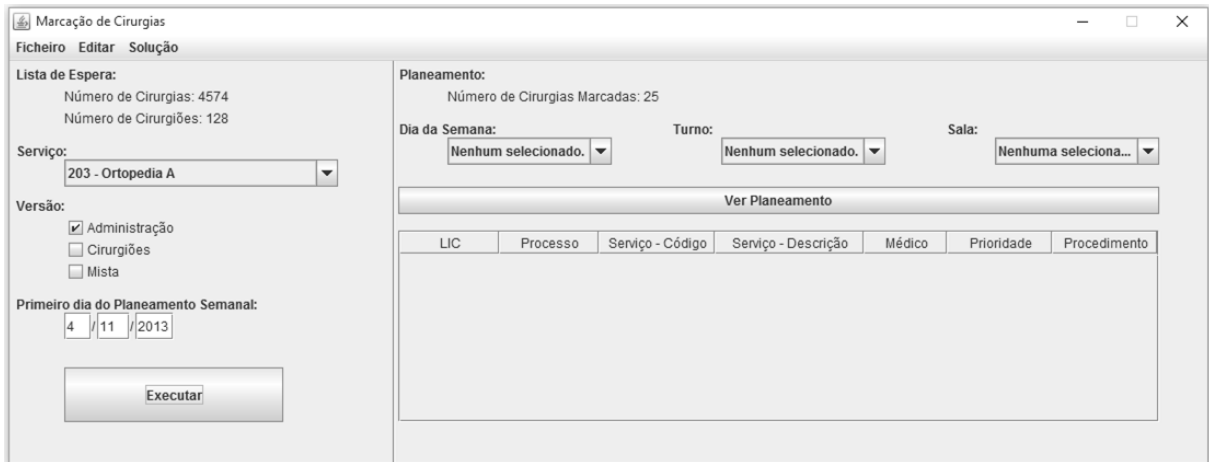


Figura 6.9. *Layout* da interface desenvolvida após execução das heurísticas

Quando o utilizador tenta executar as heurísticas sem, por exemplo, selecionar um serviço, aparece uma caixa de diálogo de alerta, de forma a ajudar o utilizador na utilização da interface desenvolvida, como exemplificado na Figura 6.10. Para além deste erro, aparecem caixas de diálogo semelhantes quando o utilizador não abre um ficheiro de dados, quando seleciona mais do que uma versão do problema, não seleciona nenhuma versão, ou quando o primeiro dia do planeamento semanal não corresponde a uma data correta.

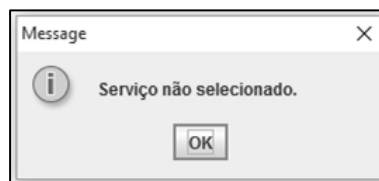


Figura 6.10. Exemplo de uma caixa de diálogo com uma mensagem de erro

6.3. Visualização dos resultados

Após existir um planeamento executado, o utilizador pode observar as cirurgias marcadas para cada dia da semana, turno e sala, bastando para isso, selecionar o dia da semana, o turno e a sala e carregar na opção Ver Planeamento. Caso queira ver as cirurgias marcadas para outro dia, turno ou sala basta selecionar parâmetros diferentes e voltar a carregar na opção Ver Planeamento. As cirurgias marcadas são mostradas como ilustrado na Figura 6.11.



Figura 6.11. *Layout* da interface desenvolvida ao ver as cirurgias marcadas para um dia da semana, turno e sala

Para além das caixas de diálogo de alerta já referidas anteriormente, caso o utilizador queira ver o planeamento sem seleccionar, por exemplo, uma sala, aparece uma caixa de diálogo idêntica.

Para além da possibilidade de ver o planeamento na interface, é também possível extrair a solução para um ficheiro Excel como exemplificado na Figura 6.12.

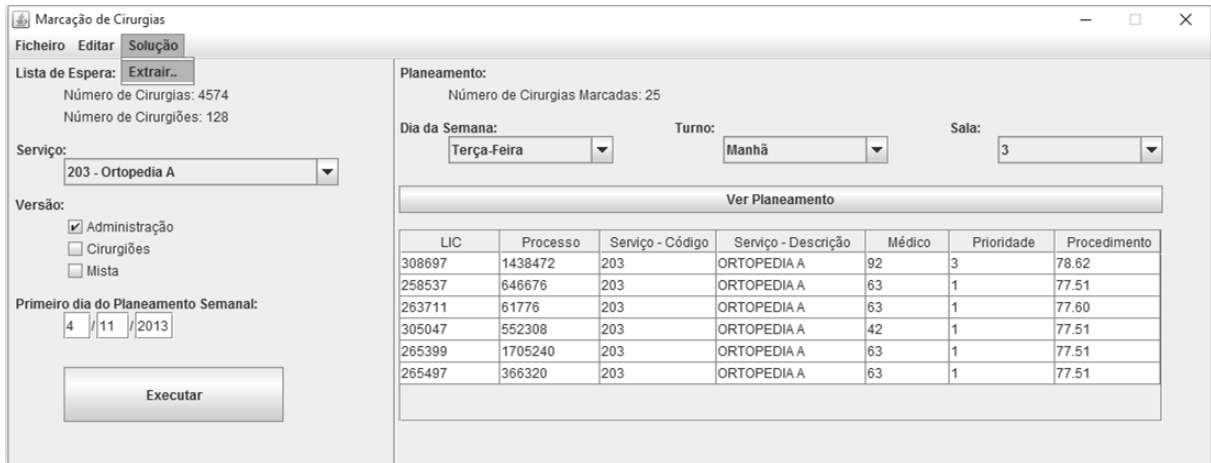


Figura 6.12. Extrair solução para um ficheiro Excel

Caso o utilizador pretenda seleccionar um novo ficheiro de dados de forma a executar as heurísticas com novos parâmetros, é necessário carregar em Ficheiro, na barra do menu superior, e posteriormente em Novo, como exibido na Figura 6.13. Desta forma, todas as seleções e parâmetros considerados são anulados, voltando a interface a ser exibida como ilustrado na Figura 6.1.

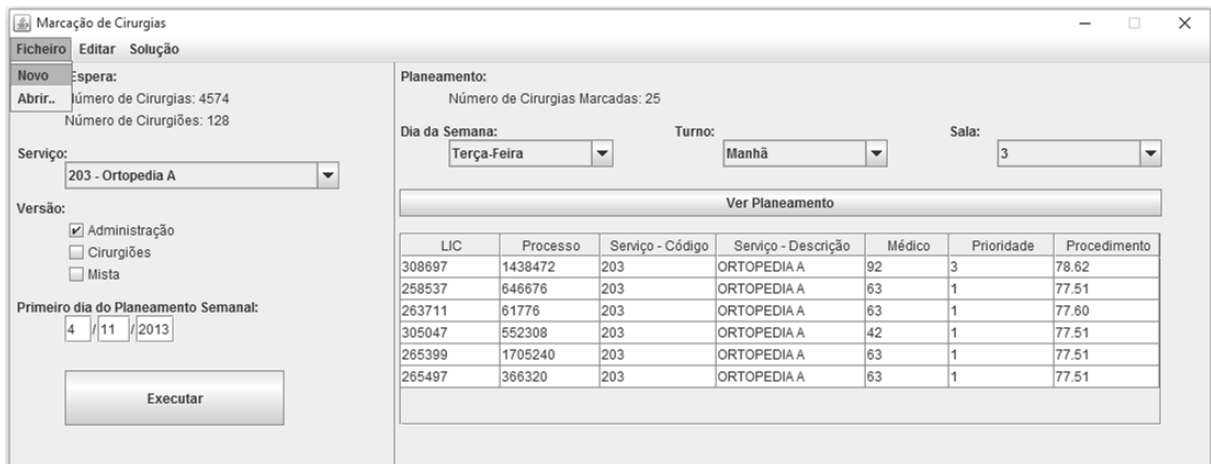


Figura 6.13. Seleccionar um novo ficheiro de dados

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

Neste último capítulo, são apresentadas breves conclusões do trabalho realizado ao longo da presente dissertação. Posteriormente, e para finalizar, são referidos alguns tópicos que pode ser importante abordar em trabalhos futuros nesta área de trabalho.

7.1. Conclusões

Nesta dissertação, foram desenvolvidas e implementadas heurísticas para auxiliar os decisores na marcação de cirurgias eletivas no hospital público em estudo, tendo em conta os objetivos e as metas definidas pelo Ministério da Saúde para a produção cirúrgica. Devido à necessidade de utilização deste estudo no hospital, foi criada uma interface de fácil utilização, que permite a leitura da lista de espera e propõe uma agenda cirúrgica semanal.

A agenda cirúrgica semanal, respeitando critérios de equidade e as metas do Ministério da Saúde, deveria ser elaborada através da escolha dos pacientes a operar que apresentem intervenções cirúrgicas com prioridade mais elevada e que estejam há mais tempo na lista de espera. Mas o estudo deste problema, já realizado por Marques e Captivo [17] através de modelos matemáticos, mostrou que a escolha dos pacientes a serem incorporados na agenda cirúrgica semanal, na maioria dos casos, não corresponde a estes critérios, de acordo com os registos hospitalares analisados. Assim, os autores elaboraram três versões para o problema e resolveram os três modelos matemáticos utilizando o CPLEX.

Neste trabalho, para obter uma agenda cirúrgica semanal para as três versões do problema, foram desenvolvidas heurísticas que diferem de acordo com a versão do problema considerada. Inicialmente, foram desenvolvidas heurísticas construtivas, de modo a obter soluções admissíveis para o problema. Posteriormente, às soluções admissíveis obtidas, foram aplicadas heurísticas de melhoramento, de forma a alcançar soluções de melhor qualidade.

A interface desenvolvida permite ao utilizador selecionar um ficheiro de dados e alguns parâmetros necessários para a execução do programa, bem como escolher a versão do problema que quer executar. Consoante a versão escolhida, as heurísticas desenvolvidas irão obter uma agenda cirúrgica semanal que pode ser vista na interface ou exportada para um ficheiro Excel.

Os resultados computacionais das heurísticas desenvolvidas, para cada versão, foram analisados e foram selecionadas quais as heurísticas a executar tendo em conta a sua eficiência, isto é, relacionando a capacidade para obter boas soluções para o problema, com o tempo computacional despendido.

Para analisar a qualidade das heurísticas, resolveram-se os modelos matemáticos através do CPLEX, para quatro instâncias reais, e as soluções obtidas foram comparadas com as soluções obtidas pelas heurísticas. Observou-se que os resultados obtidos pelas heurísticas, para as três versões do problema e para as quatro instâncias testadas, foram bastante bons, chegando, em alguns casos, a

igualar a qualidade das soluções obtidas pela otimização dos modelos matemáticos, com tempo de execução inferior.

Portanto, as heurísticas desenvolvidas, apresentam bons resultados num tempo computacional reduzido para o problema em estudo, independentemente da versão do problema escolhida e, por isso, através da interface, são um bom meio para obter um sistema de marcação de cirurgias eletivas, tornando o processo de marcação mais automatizado e sistemático.

7.2. Trabalho futuro

Os algoritmos desenvolvidos no âmbito desta dissertação obtiveram bons resultados, mas, quando a agenda cirúrgica obtida para uma determinada semana é aplicada, é importante que a previsão da duração das cirurgias utilizada para executar as heurísticas seja a mais próxima possível da realidade. Como concluído no capítulo referente à análise dos resultados, o facto de as durações das cirurgias serem estocásticas leva a que, obrigatoriamente, exista um erro associado à agenda cirúrgica semanal que poderá ter implicações práticas desagradáveis para os pacientes e para os cirurgiões, bem como para o funcionamento do bloco operatório.

Seria interessante fazer um estudo detalhado das características da intervenção cirúrgica, do paciente e do cirurgião, que influenciam a duração das cirurgias, de forma a estimar este parâmetro do problema da melhor forma possível.

Assim, criando, por exemplo, um programa, que, através das características dos pacientes, dos cirurgiões e da intervenção cirúrgica, obtivesse boas estimativas para a duração das cirurgias e, se estes valores fossem adicionados à interface criada nesta dissertação, as agendas cirúrgicas seriam mais robustas e os parâmetros utilizados representariam melhor a realidade.

Uma vez que é do maior interesse a interface criada ser testada e utilizada na dinâmica do hospital em estudo, é sempre relevante melhorar a interface do ponto de vista de aplicação informática. Poderá ser interessante personalizar a interface, de modo a torná-la mais orientada ao utilizador ou torná-la mais completa e com mais indicadores estatísticos de maneira a ajudar o utilizador a escolher a agenda cirúrgica mais adequada para ser colocada em prática.

Referências

- [1] Cardoen, B., Demeulemeester, E., Beliën, J., “Operating room planning and scheduling: a literatura review”, *European Journal of Operational Research*, vol. 201, n° 3, pp. 921-932, 2010.
- [2] Guerriero, F., Guido, R., “Operational research in the management of the operating theatre”, *Health Care Management Science*, vol. 14, n° 1, pp. 89-114, 2011.
- [3] Van Riet, C., Demeulemeester, E., “Trade-offs in operating room planning for electives and emergencies: a review”, *Operations Research for Health Care*, vol. 7, n° 1, pp. 52-69, 2015.
- [4] Baligh, H., Laughhunn, D., “An economic and linear model of the hospital”, *Health Services Research*, vol. 4, n° 4, pp. 293-303, 1969.
- [5] Hughes, W., Soliman, S., “Short-term case mix management with linear programming”, *Hospital Health Services Administration*, vol. 30, pp. 52-60, 1985.
- [6] Blake, J., Carter, M., “A goal programming approach to strategic resource allocation in acute care hospitals”, *European Journal of Operational Research*, vol. 140, pp. 541-561, 2002.
- [7] Ma, G., Beliën, J., Demeulemeester, E., Wang, L., “Solving the strategic case mix problem optimally by using branch-and-price algorithms”, in: *Proceedings of the ORAHS*, Leuven, Belgium, 2009.
- [8] Blake, J., Dexter, F., Donalds, J., “Operating room managers' use of integer programming for assigning block time to surgical groups: a case study”, *Anesthesia & Analgesia*, vol. 94, pp. 143-148, 2002.
- [9] Vissers, J., Adan, I., Bekkers, J., “Patient mix optimization in tactical cardiothoracic surgery planning: a case study”, *IMA Journal of Management Mathematics*, vol. 16, pp. 281-304, 2005.
- [10] van Oostrum, J., Van Houdenhoven, M., Hurink, J., Hans, E., Wullink, G., Kazemier, G., “A master surgical scheduling approach for cyclic scheduling in operating room departments”, *OR Spectrum*, vol. 30, pp. 355-374, 2008.
- [11] Beliën, J., Demeulemeester, E., Cardoen, B., “A decision support system for cyclic master surgery scheduling with multiple objectives”, *Journal of Scheduling*, vol. 14, pp. 147-161, 2009.
- [12] Fei, H., Meskens, N., Chu, C., “An operating theatre planning and scheduling problem in the case of a "block scheduling" strategy”, in: *Service Systems and Service Management, 2006 International Conference, IEEE*, vol. 1, p. 422-428, 2006.
- [13] Roland, B., Di Martinelly, C., Riane, F., Pochet, Y., “Scheduling an operating theatre under human resource constraints”, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 58, pp. 212-220, 2010.

- [14] Ogulata, S., Erol, R., “A hierarchical multiple criteria mathematical programming approach for scheduling general surgery operations in large hospitals”, *Journal of Medical Systems*, vol. 27, n° 3, pp. 259-270, 2003.
- [15] Hans, E., Wullink, G., van Houdenhoven, M., Kazemier, G., “Robust surgery loading”, *European Journal of Operational Research*, vol. 185, pp. 1038-1050, 2008.
- [16] Addis, B., Carello, G., Tànfani, E., “A robust optimization approach for the Advanced Scheduling Problem with uncertain surgery duration in Operating Room Planning - an extended analysis”, *HAL*, 2014.
- [17] Marques, I., Captivo, M., “Different stakeholders’ perspectives for a surgical case assignment problem: deterministic and robust approaches”, *submitted to: European Journal of Operational Research*, 2016.
- [18] Arnaout, J.P., Kulbashian, S., “Maximizing the utilization of operating rooms with stochastic times using simulation”, in: *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation*, pp. 1617-1623, 2008.
- [19] Cardoen, B., Demeulemeester, E., Beliën, J., “Optimizing a multiple objective surgical case sequencing problem”, *International Journal of Production Economics*, vol. 119, pp. 354-366, 2009.
- [20] Testi, A., Tànfani, E., Torre, G., “A three-phase approach for operating theatre schedules”, *Health Care Management Science*, vol. 10, pp. 163-172, 2007.
- [21] Marques, I., Captivo, M., Pato, M., “An integer programming approach to elective surgery scheduling. Analysis and comparison based on a real case”, *OR Spectrum*, vol. 34, pp. 407-427, 2012.
- [22] Marques, I., Captivo, M., Pato, M., “Exact and heuristic approaches for elective surgery scheduling”, in: *Proceedings of the CLAIO/SBPO 2012, Rio de Janeiro*, pp. 3729-3738, 2012.
- [23] Marques, I., Captivo, M., Pato, M., “Scheduling elective surgeries in a Portuguese hospital using a genetic heuristic”, *Operations Research for Health Care*, vol. 3, pp. 59-72, 2014.
- [24] Marques, I., Captivo, M., Pato, M., “A bicriteria heuristic for an elective surgery scheduling problem”, *Health Care Management Science*, vol. 18, pp. 251-266, 2015.
- [25] Marques, I., Captivo, M., “Bicriteria elective surgery scheduling using an evolutionary algorithm”, *Operations Research for Health Care*, vol. 7, pp. 14-26, 2015.
- [26] Ministério da Saúde, “Portaria n.º 87/2015”, *Diário da República*, 1.ª série — N.º 57, pp. 1656-1659, 2015.
- [27] Ministério da Saúde, “Portaria n.º 45/2008”, *Diário da República*, 1.ª série — N.º 10, pp. 526-536, 2008.