

**MESTRADO EM**  
**MÉTODOS QUANTITATIVOS PARA A DECISÃO**  
**ECONÓMICA E EMPRESARIAL**

**TRABALHO FINAL DE MESTRADO**  
TRABALHO DE PROJETO

Escalonamento de pacientes num serviço  
hospitalar de Radioterapia

TIAGO MENDES AFONSO

OUTUBRO - 2017



**MESTRADO EM**  
**MÉTODOS QUANTITATIVOS PARA A DECISÃO**  
**ECONÓMICA E EMPRESARIAL**

**TRABALHO FINAL DE MESTRADO**  
**TRABALHO DE PROJETO**

Escalonamento de pacientes num serviço  
hospitalar de Radioterapia

TIAGO MENDES AFONSO

**ORIENTAÇÃO:**

PROFESSORA DOUTORA LEONOR ALMEIDA LEITE SANTIAGO  
PINTO

OUTUBRO – 2017

## **Agradecimentos**

Sendo o processo de desenvolvimento de um Trabalho de Final de Mestrado um processo moroso e de difícil execução, todo o suporte e apoio que é dado pelas pessoas que fazem parte da nossa vida é bem-vindo.

Como tal, em primeiro lugar, gostava de agradecer à Professora Doutora Leonor Santiago Pinto por toda a disponibilidade que demonstrou desde o primeiro dia e por todo o apoio dado durante o desenvolvimento do projeto. Sem a sua ajuda não seria possível atingir todos os objetivos definidos para a realização do presente projeto.

Em segundo lugar, deixar um agradecimento à colega Margarida Oliveira que sempre se mostrou disponível para me ajudar, passando toda a informação relevante que considerou na realização do seu projeto. Deixar também uma palavra de agradecimento a todos os docentes do Mestrado em Métodos Quantitativos para a Decisão Económica e Empresarial pelo conhecimento transmitido durante estes dois anos.

Queria também deixar um agradecimento a toda a equipa do Hospital da Luz, nomeadamente ao Dr. Filipe Costa por todo o interesse demonstrado no projeto e ainda aos Técnicos que me deram todo o suporte que eu necessitava para o desenvolvimento de todo o trabalho. Deixar uma palavra de agradecimento especial à Técnica Carla Miguel por se ter mostrado sempre disponível para me receber e para responder às minhas perguntas.

Por fim, mas não menos importante, um agradecimento a toda a minha família. Aos meus pais, João e Vera e aos meus irmãos, Filipa e Bernardo, um obrigado especial por toda a paciência, apoio e por serem as referências que são na minha vida.

**Resumo**

O tema do presente Trabalho de Final de Mestrado é a otimização do escalonamento de pacientes no serviço de Radioterapia do Hospital da Luz. Semanalmente são escalonados os pacientes que iniciam os seus tratamentos mantendo a escala dos pacientes cujos tratamentos se encontram a decorrer.

Numa primeira fase foi necessário compreender todo o funcionamento do serviço, bem como os tratamentos de radioterapia. Numa segunda fase, foi recolhida informação mais específica acerca do processo de escalonamento utilizado para decidir quais seriam as abordagens a considerar.

Para traduzir o problema encontrado são apresentados dois modelos de Programação Linear Inteira. Os modelos são testados numa instância gerada aleatoriamente com dimensão próxima da real. Os resultados obtidos foram analisados comparativamente procurando-se igualmente estudar uma possibilidade de combinação de ambos.

**Palavras-chave:** escalonamento, radioterapia, Modelos de Programação Linear Inteira

**Abstract**

The theme of this Masters Final Work is focused on the optimization of a schedule of patients in the Radiotherapy service of Hospital da Luz. Patients who start their treatments are weekly staggered, keeping the scale of patients whose treatments are in progress.

First, it was necessary to understand the whole operation of the service, as well as the radiotherapy treatments. In a second phase, more specific information about the scheduling process used was collected in order to decide which approaches should be considered.

To translate the problem found, two Integer Linear Programming Models are presented. The models were tested in a randomly generated instance with a dimension close to what was observed. The obtained results were comparatively analyzed, and a possibility of combining the two models was also studied.

**Keywords:** scheduling, radiotherapy, Integer Linear Programming Models

**Índice**

Agradecimentos .....	I
Resumo .....	II
Abstract .....	III
Índice de Tabelas .....	V
Índice de Figuras .....	V
Lista de Siglas e Acrónimos .....	VI
Introdução .....	1
Objetivos e estrutura do projeto .....	2
1. Enquadramento do problema .....	4
1.1 Serviço de Radioterapia do Hospital da Luz .....	4
1.2 Características do problema .....	5
2. Revisão Bibliográfica .....	7
3. Descrição do Caso de Estudo .....	10
3.1 Hipóteses de simplificação do problema .....	11
3.2 Elementos essenciais .....	12
3.3 Geração de Instâncias .....	15
4. Metodologia .....	17
5. Teste dos Modelos .....	21
5.1 Análise de resultados .....	23
6. Conclusões e Perspetivas de trabalho futuro .....	28
7. Referências Bibliográficas .....	30
8. Anexos .....	32
8.1 Anexo A – Escala Inicial .....	32
8.2 Anexo B – Escalonamento 1 .....	33
8.3 Anexo C – Escalonamento 2 .....	34
8.4 Anexo D – Escalonamento 3 .....	35
8.5 Anexo E – Escalonamento 4 .....	36

**Índice de Tabelas**

Tabela 1 - Informação para pacientes já presentes na escala (Exemplo) .....	13
Tabela 2 - Informação para pacientes a inserir na escala (Exemplo) .....	13
Tabela 3 - Escala Inicial (Exemplo) .....	14
Tabela 4 - Escala Final (Exemplo) .....	14
Tabela 5 - Probabilidade considerada para cada patologia .....	16
Tabela 6 - Informação para pacientes já presentes na escala (Instância de Teste)	22
Tabela 7 - Informação para pacientes a inserir na escala (Instância de Teste) .....	22
Tabela 8 - Definição das penalizações para o modelo B.....	24
Tabela 9 - Resultados para o escalonamento com modelos em separado .....	25
Tabela 10 – Otimização do modelo B com restrição ao valor do objetivo do modelo A .....	26
Tabela 11 – Otimização do modelo A com restrição ao valor do objetivo do modelo B .....	26
Tabela 12 - Resumo resultados para a instância de teste .....	27

**Índice de Figuras**

Figura 1 - Previsão de casos do foro oncológico em Portugal .....	1
Figura 2 - Tumores mais frequentes em Portugal, 2010 .....	15

## **Lista de Siglas e Acrónimos**

DGS – Direção Geral da Saúde

IARC – *International Agency for Research on Cancer*

OMS – Organização Mundial da Saúde

IGRT – *Image-Guided Radiation Therapy*

IMRT – *Intensity-Modulated Radiation Therapy*

VMAT – *Volumetric Modulated Arc Therapy*

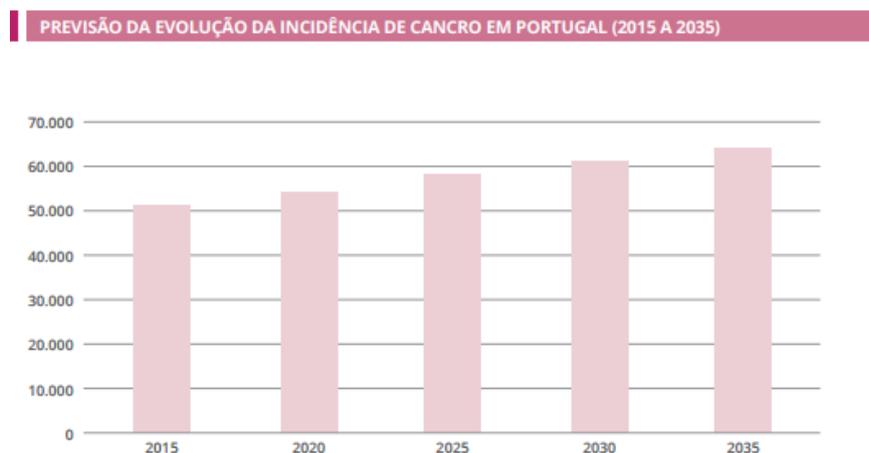
IMAT – *Intensity Modulated Arc Therapy*

SBRT – *Stereotatic Body Radiation Therapy*

VBA – *Visual Basic for Applications*

## Introdução

As doenças oncológicas e as suas consequências são, nos dias de hoje, um problema cada vez mais presente na sociedade portuguesa e os rastreios mais recentes apontam para o aumento do número de doentes ao longo dos anos. Devido a esse facto, o tema tem merecido uma atenção especial por parte da Direção Geral da Saúde (DGS) com o objetivo de encontrar formas de minimizar os efeitos do impacto destas doenças [6]. Os dados da *International Agency for Research on Cancer (IARC)*, organismo da OMS, apontam exatamente nesse sentido. Até 2035 prevê-se que o número de casos do foro oncológico, em território nacional, venha a aumentar para, aproximadamente, 65.000 casos. Este valor corresponde a um aumento de cerca de 12.000 casos quando comparado com o número de casos observados em 2015, como se pode observar na Figura 1 [6].



*Figura 1 - Previsão de casos do foro oncológico em Portugal*

Fonte: Doenças Oncológicas em Números – 2015, DGS

O aumento dos casos clínicos, foi acompanhado por um acréscimo dos recursos humanos e materiais que permitem dar uma resposta mais adequada e de acordo com os objetivos definidos pela DGS no combate a este flagelo.

## **Objetivos e estrutura do projeto**

O presente projeto tem como objetivo a aplicação de métodos de Investigação Operacional a um caso real. Com esse intuito, utilizam-se os conceitos e técnicas de forma a realizar o escalonamento semanal otimizado para um conjunto de pacientes em tratamentos de radioterapia. De referir que o projeto foi elaborado em parceria com o Hospital da Luz, nomeadamente com o seu serviço de radioterapia. O principal objetivo do projeto é escalonar todos os pacientes que estão aptos a iniciar tratamentos, respeitando a escala dos pacientes cujos tratamentos já se encontram a decorrer.

O projeto surge no seguimento de um outro realizado pela colega Margarida Oliveira [11], que procura um escalonamento que tem como principal objetivo a maximização da oferta de tratamentos por dia, minimizando o tempo de inatividade do serviço no seu horário de funcionamento diário.

De forma a apresentar a metodologia e as conclusões retiradas, o presente projeto foi dividido em seis partes.

Na primeira parte é feito o enquadramento do problema a ser tratado, bem como uma breve apresentação do serviço de Radioterapia do Hospital da Luz e das condicionantes a considerar que advém do funcionamento do serviço.

A segunda parte é composta por uma breve revisão da literatura sobre metodologias seguidas no tratamento do problema de escalonamento no setor da saúde.

Na terceira parte procede-se à descrição do caso de estudo e da abordagem seguida, bem como de todas as hipóteses e outras considerações para a simplificação do problema. Para além destes tópicos, é apresentada uma instância de pequena dimensão para ilustrar o processo de escalonamento. Por fim, são descritos todos os pressupostos seguidos para a geração de instâncias de maior dimensão.

Na quarta parte, são apresentados os dois modelos de Programação Linear Inteira construídos. São ainda clarificadas todas as componentes dos modelos (notação, variáveis e restrições).

A quinta parte dedica-se ao teste dos modelos. Inicia-se com a apresentação de uma instância de teste que pretende replicar uma semana de tratamentos no serviço de radioterapia do Hospital da Luz e que foi gerada de acordo com o procedimento descrito na terceira parte do projeto. Por motivos de sigilo, a instância de teste não utiliza quaisquer informações dos pacientes em tratamento. Os modelos são testados e comparados com base nos resultados obtidos por esta instância.

Na sexta parte, são apresentadas as principais conclusões do presente projeto e as principais limitações encontradas ao longo do processo. São ainda destacadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

## **1. Enquadramento do problema**

De forma a que o projeto reproduzisse, da forma mais fiel possível, a realidade vivida no serviço de Radioterapia do Hospital da Luz, foi necessário visitar o serviço para observar o seu funcionamento. Numa primeira visita foi dado a conhecer o serviço, as instalações e foi feito o levantamento de informação juntamente dos técnicos, que responderam a um conjunto de perguntas formuladas para o efeito. Após esta primeira visita, foi feita uma outra com o objetivo de observar *in loco* o fluxo de pacientes, bem como a transição entre tratamentos. A partir destas visitas foi possível ficar a conhecer a visão dos técnicos relativamente às abordagens que poderiam ser consideradas para a resolução do problema de escalonamento e, desta forma, ter uma opinião fundamentada sobre aspetos importantes a ter em linha de conta.

### **1.1 Serviço de Radioterapia do Hospital da Luz**

O serviço Radioterapia do Hospital da Luz desenvolve a sua atividade desde Setembro de 2008. O departamento funciona oito horas por dia, cinco dias por semana.

Para fornecer os tratamentos aos seus pacientes, o serviço de Radioterapia do Hospital da Luz dispõe de um Acelerador Linear para efetuar a radiação e três vestiários utilizados pelos pacientes para se prepararem para os respetivos tratamentos. O Hospital da Luz orgulha-se de conciliar tecnologia, recursos humanos e multidisciplinaridade, o que faz com que este departamento se torne único a nível nacional [10]. Todas estas características permitem ter uma oferta ampliada de técnicas terapêuticas de última geração que garantem a minimização da irradiação de tecidos saudáveis aquando da administração da radiação ao tumor.

De entre as técnicas utilizadas no Hospital da Luz, há a destacar: técnica de braquiterapia de alta e de baixa taxa de dose; técnica de radioterapia guiada por imagem (IGRT); técnica de radioterapia de intensidade modulada (IMRT); técnica de arcoterapia volumétrica de intensidade modulada (VMAT); técnica de radioterapia de intensidade modulada por arcos dinâmicos (IMAT); técnica de radioterapia estereotáxica craniana e corporal (SBRT); técnica de radiocirurgia [10]. Todos os tratamentos são administrados pelo mesmo equipamento (Acelerador Linear). Como tal, apenas é possível efetuar tratamentos a um paciente de cada vez. Tendo em consideração a patologia a tratar e a técnica a utilizar na radiação, o Acelerador Linear necessita de ser adaptado para cada paciente.

No presente trabalho, não foram consideradas distinções entre técnicas de tratamento por uma questão de simplificação do problema.

## **1.2 Características do problema**

O fluxo de entrada e saída de pacientes no serviço de Radioterapia do Hospital da Luz é feito com grande naturalidade. Para efeitos de programação dos tratamentos a efetuar, às sextas-feiras é revista a escala referente à semana que se segue, onde se verifica quais são os pacientes que terminam e os que dão início aos seus tratamentos. Assim, em cada sexta-feira estão identificados todos os pacientes que, na semana seguinte, vão estar presentes no serviço.

Para um bom funcionamento do serviço, a inclusão na escala dos pacientes a iniciar tratamentos observa um conjunto de regras, nomeadamente a manutenção dos horários de quem prossegue os seus tratamentos.

Relativamente aos novos pacientes sabe-se, para cada um, o dia de início dos seus tratamentos, o tipo de tratamento a realizar e ainda a sua preferência horária. Naturalmente, as preferências de horário só poderão ser atendidas caso coincidam com os turnos que ficaram disponíveis, isto é, caso não haja conflitualidade com os horários de pacientes que continuam a realizar tratamentos. Relativamente aos pacientes que já se encontram no serviço, é importante saber o tipo de tratamento, bem como o dia em que terminam os seus tratamentos de forma a determinar todos os turnos que podem ser ocupados por novos pacientes, ou seja, que ficam disponíveis.

#### Componentes do problema:

Por dia, cada paciente apenas pode realizar um tratamento, ocupando desta forma um turno na escala. A partir do momento em que um paciente é escalonado para realizar o seu tratamento em determinado horário, fica afeto a esse mesmo horário até ao final dos seus tratamentos. Qualquer alocação de um paciente a um turno na escala, tenta respeitar uma sequência que permita que pacientes que necessitem dos mesmos acessórios para realizar os seus tratamentos surjam em horários consecutivos. Desta forma, a transição entre tratamentos consome menos tempo.

Qualquer tratamento tem que ser efetuado num dia útil durante o horário de funcionamento do serviço. Eventualmente, em casos excecionais, pode ser considerado um turno antes das 8h. Naturalmente, a duração dos tratamentos varia consoante os tipos e técnicas utilizadas.

## 2. Revisão Bibliográfica

*“Scheduling is described as ‘defining the sequence and time allocated to the activities of an operation. It is the construction of a detailed timetable that shows at what time or date jobs should start and when they should end’.” [2]*

Num contexto empresarial, existe sempre a necessidade de acompanhamento das tendências em termos de desenvolvimento tecnológico de forma a aumentar a satisfação de todos os interessados nos serviços prestados. Quando se fala no setor da saúde, esta necessidade está ainda mais presente. É absolutamente fundamental que se consigam disponibilizar aos pacientes os tratamentos mais adequados e, sobretudo, mais desenvolvidos do ponto de vista técnico. Como o setor da saúde está em constante atualização, é de extrema importância que os hospitais consigam recorrer às técnicas mais recentes e que os métodos utilizados sejam otimizados de forma a poder providenciar aos pacientes os tratamentos mais eficientes e eficazes de acordo com as suas necessidades. Nesse sentido, esta temática tem sido alvo de estudos aprofundados.

*“The majority of the scientific contributions, related to the development of scheduling procedures in health care systems, is centered around nurse scheduling, optimal assignment of outpatients to medical resources and surgery scheduling.” [4]*

São facilmente identificáveis várias publicações científicas que incidem sobre o escalonamento de pacientes e tratamentos de radioterapia [4] [7] [8] [9] [13], escalonamento de turnos para enfermeiros [1] [3] e escalonamentos de cirurgias [2] [5]. Independentemente de algumas semelhanças de abordagens e metodologias, o problema de escalonamento de pacientes de radioterapia apresenta especificidades que necessitam de um tratamento particular.

“The radiotherapy treatment scheduling problem can be defined as the problem of scheduling a given number of radiotherapy treatment sessions on linear accelerator machines.” [9]

Uma das principais questões levantadas pelas publicações existentes é a necessidade da diminuição dos tempos médios de espera dos pacientes que se encontram aptos para iniciar tratamentos [4] [13]. Há ainda publicações que identificam o problema de escalonamento de pacientes nos serviços de Radioterapia como sendo um *job-shop problem* [13]. Este tipo de problemas envolve um conjunto finito de tarefas para serem executadas por um conjunto limitado de recursos (aceleradores lineares no caso da Radioterapia). O principal objetivo destas publicações foca-se em minimizar o tempo que decorre desde a prescrição dos tratamentos até à realização do primeiro tratamento, questão que não é objeto deste projeto pois a data de início dos tratamentos é um dado do problema.

Os *job-shop problems* podem ser classificados como estáticos ou dinâmicos. Nos problemas estáticos, o número de tarefas é conhecido e fixo. Nos problemas dinâmicos, são consideradas perturbações que podem afetar a execução das tarefas. Como tal, os problemas de escalonamento de pacientes de Radioterapia podem ser definidos como *job-shop problems* dinâmicos [13] devido ao facto de os pacientes possuírem características diferentes e de se poderem verificar perturbações nas reações aos tratamentos.

No que diz respeito às estratégias utilizadas para lidar com os problemas de escalonamento de pacientes de Radioterapia, é feita a distinção entre *block* e *non-block systems* [4]. Nos *block systems*, as escalas diárias são divididas num número de turnos

fixo, que normalmente têm a mesma duração (entre 10 a 15 minutos). Nos *non-block systems*, os pacientes são alocados a turnos com durações distintas e são atendidos numa ótica de *First In First Out* (FIFO).

Embora nas publicações encontradas, o tema do reescalonamento esteja mais relacionado e adaptado aos turnos de enfermeiros [1], a necessidade de atualização das escalas definidas está presente nos problemas de escalonamento de pacientes de Radioterapia. Tendo em consideração que os hospitais estão sujeitos a consequências que decorrem de acontecimentos imprevisíveis, é necessário existir um mecanismo de adequação e resposta a esses mesmos acontecimentos [3]. Os serviços de Radioterapia não são exceção e necessitam de se acautelar perante estas eventualidades. Naturalmente que o que se pretende será minimizar o impacto de alterações nas escalas naquilo que é o dia a dia do hospital e dos serviços que presta aos seus pacientes.

Para além dos tópicos apresentados, recentemente foi conduzido um estudo [14] que pretende ajudar na definição de planos de tratamentos para os pacientes. Este estudo tenta quantificar, através de intervalos de confiança, a exposição de determinado plano de tratamentos a restrições e eventos imprevisíveis. Neste sentido, é desenvolvido um modelo baseado nessas restrições cujo objetivo se centra na maximização da confiança dos intervalos produzidos, de forma a definir os planos de tratamentos que melhor se adequam às características e patologia de cada paciente.

### **3. Descrição do Caso de Estudo**

Como atrás se mencionou, o presente trabalho surge no seguimento de um outro projeto [11] e, como tal, foi necessário fazer o levantamento de novas diretrizes a considerar para o tratamento do problema identificado.

Nesse sentido, procedeu-se à recolha de toda a informação relevante através do acesso concedido pelo Hospital da Luz às suas instalações. Com este acesso, foi possível ter um contacto direto com os técnicos do serviço de Radioterapia e foi possível observar o fluxo de pacientes do serviço durante um dia. Com a informação recolhida, foram construídas quatro escalas. Em cada uma das escalas foi considerado um objetivo diferente para a alocação dos pacientes: i) proximidade de tratamentos que utilizam técnicas semelhantes; ii) proximidade de tratamentos a patologias semelhantes; iii) ordem decrescente dos tempos de tratamento; iv) ordem crescente dos tempos de tratamento. Para aferir como seriam avaliados os escalonamentos construídos, foram apresentadas as escalas diretamente à técnica responsável do serviço. Foi então transmitida a informação de que dois dos escalonamentos se adaptavam ao funcionamento do serviço: em primeiro lugar, a ordem decrescente dos tempos de tratamentos e, em segundo lugar, a proximidade de tratamentos a patologias semelhantes.

A partir do momento em que foi recolhida esta informação, percebeu-se que a abordagem seguida pelo projeto da colega Margarida Oliveira [11] deveria sofrer alterações, nomeadamente nos objetivos a considerar para realizar o escalonamento semanal dos pacientes.

Assim, no presente projeto foram seguidas as indicações transmitidas como as mais aproximadas do funcionamento do serviço, ou seja, foram considerados dois objetivos para o escalonamento dos pacientes. O primeiro objetivo fará com que os tratamentos mais demorados sejam realizados ao início do dia e, o segundo objetivo, considerado também em [11], fará com que os pacientes com patologias semelhantes efetuem os seus tratamentos de forma consecutiva para evitar constantes adaptações de equipamentos.

### **3.1 Hipóteses de simplificação do problema**

Embora exista uma tentativa clara de aproximar a abordagem seguida no desenvolvimento do projeto àquela que é utilizada no dia a dia do serviço de Radioterapia do Hospital da Luz, é necessário admitir hipóteses que permitam chegar a um modelo adequado. Nesse sentido, as hipóteses assumidas foram:

- 1) A escala semanal é dividida em turnos de 10 minutos;
- 2) São considerados dois tipos de pacientes consoante os tempos de tratamento. Como a escala semanal está dividida em turnos de 10 minutos, um paciente ocupa apenas um turno por dia se o seu tratamento for do tipo curto (Tipo 1 – tratamentos de 10 minutos) e ocupa dois turnos por dia se o seu tratamento for do tipo longo (Tipo 2 – tratamentos de 20 minutos);
- 3) O tempo considerado para os tratamentos (10 ou 20 minutos) engloba, não só o tempo de radiação, mas também o tempo de preparação que cada paciente necessita antes de dar início ao tratamento;

- 4) Não é feita distinção entre técnicas de tratamento. Apenas são feitas distinções para os tipos de pacientes (Tipo 1 ou Tipo 2), de acordo com a duração dos seus tratamentos e, para as patologias de cada paciente.

### **3.2 Elementos essenciais**

Após a consideração de todas as hipóteses para a simplificação do problema, é de extrema importância que se avaliem os elementos que permitem avançar para o escalonamento dos pacientes para cada semana. Em primeiro lugar, têm que ser conhecidos os novos pacientes, ou seja, aqueles que irão iniciar os seus tratamentos. Em segundo lugar, tem que se ter em consideração todos os pacientes cujos tratamentos estão a decorrer. Por fim, é necessário associar a cada paciente uma série de características que permitam efetuar o escalonamento de acordo com as regras e objetivos definidos.

#### Características dos pacientes:

- Para todos os pacientes, é necessário conhecer a patologia e o tipo (Tipo 1 ou Tipo 2).
- Para os pacientes que se pretende que iniciem os tratamentos, para além das duas características referidas, é necessário conhecer o dia de início dos tratamentos. Para os pacientes cujos tratamentos já se encontram a decorrer, para além do tipo e da patologia, é necessário conhecer os turnos que ocupam na escala e ainda o dia em que os tratamentos são concluídos.

Para efetuar o escalonamento, os técnicos têm acesso a toda a informação relativa às características dos pacientes.

Em seguida, apresenta-se um pequeno exemplo que vai ser utilizado com fins ilustrativos até ao fim da presente exposição. A instância tem 10 turnos por dia, 5 dias por semana e pretendem-se incluir 4 novos pacientes numa escala onde já se encontram a efetuar tratamentos 2 pacientes. Na tabela 1 está a informação relativa às características dos pacientes com tratamentos a decorrer. Na tabela 2, encontram-se os dados para os 4 novos pacientes.

*Tabela 1 - Informação para pacientes já presentes na escala (Exemplo)*

	<b>Turno</b>	<b>Dia de conclusão</b>	<b>Tipo</b>	<b>Patologia</b>
<b>Paciente 5</b>	2	5	1	12 - Mama
<b>Paciente 6</b>	7	4	2	6 - Cólon

*Tabela 2 - Informação para pacientes a inserir na escala (Exemplo)*

	<b>Dia de início</b>	<b>Tipo</b>	<b>Patologia</b>
<b>Paciente 1</b>	2	1	8 - Reto
<b>Paciente 2</b>	4	1	6 - Cólon
<b>Paciente 3</b>	2	1	1 - Laringe
<b>Paciente 4</b>	1	2	8 - Reto

Às sextas feiras os técnicos têm acesso ao que denominamos por escala inicial. A escala inicial do exemplo está apresentada na tabela 3. Note-se que o paciente 5 é de Tipo 1 e, como tal, ocupa apenas um turno enquanto o paciente 6 é de Tipo 2, ocupando por isso dois turnos consecutivos.

Tabela 3 - Escala Inicial (Exemplo)

Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira
<b>Paciente 5</b>				
<b>Paciente 6</b>	<b>Paciente 6</b>	<b>Paciente 6</b>	<b>Paciente 6</b>	
<b>Paciente 6</b>	<b>Paciente 6</b>	<b>Paciente 6</b>	<b>Paciente 6</b>	

Segue-se a tabela 4 com uma possível escala final para o exemplo, ou seja, uma solução para o problema que se pretende resolver.

Tabela 4 - Escala Final (Exemplo)

Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira
	<b>Paciente 3</b>	<b>Paciente 3</b>	<b>Paciente 3</b>	<b>Paciente 3</b>
<b>Paciente 5</b>				
<b>Paciente 4</b>				
<b>Paciente 4</b>				
	<b>Paciente 1</b>	<b>Paciente 1</b>	<b>Paciente 1</b>	<b>Paciente 1</b>
			<b>Paciente 2</b>	<b>Paciente 2</b>
<b>Paciente 6</b>	<b>Paciente 6</b>	<b>Paciente 6</b>	<b>Paciente 6</b>	
<b>Paciente 6</b>	<b>Paciente 6</b>	<b>Paciente 6</b>	<b>Paciente 6</b>	

### 3.3 Geração de Instâncias

Como referido anteriormente, por motivos de confidencialidade, não foi utilizada informação dos pacientes em tratamento no serviço de Radioterapia do Hospital da Luz, havendo, portanto, necessidade de simular dados. A instância usada nos testes foi gerada com recurso a números pseudoaleatórios para determinar o tipo de cada paciente e ainda o dia de início ou dia de fim de tratamentos, consoante um paciente vai ser inserido ou já se encontra na escala.

Tipo – Distribuição Uniforme Discreta entre 1 e 2

Dia – Distribuição Uniforme Discreta entre 1 e 5

Para a associação de uma patologia a cada um dos pacientes, foram utilizados os dados do relatório “Registo Oncológico Nacional 2010” produzido pelo Registo Oncológico Regional do Norte [12].

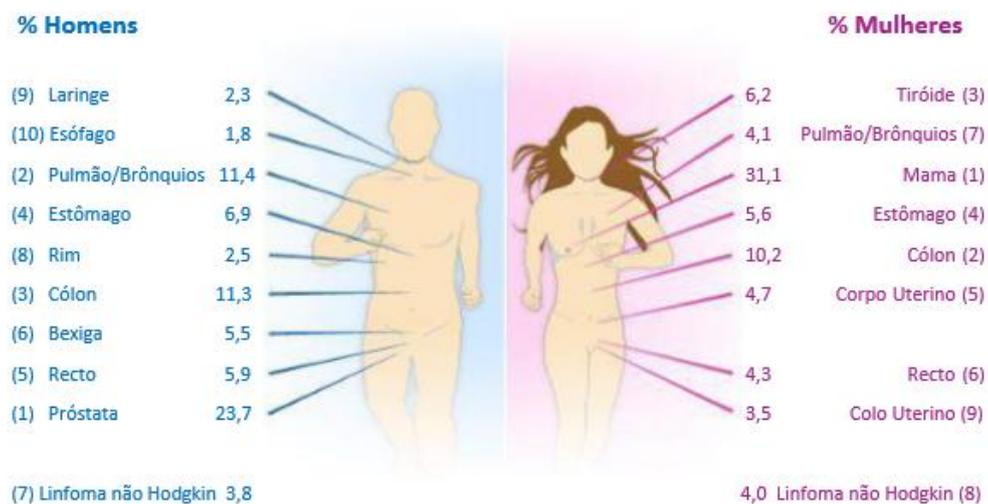


Figura 32 - Tumores mais frequentes em Portugal, 2010

Fonte: Registo Oncológico Nacional – 2010, RORENO

Na Figura 2 estão discriminadas as percentagens referentes às patologias mais frequentes para o sexo masculino e feminino, no ano de 2010. Para os homens, nesse ano, foram registados 25.658 casos estando classificados na figura acima 75.1% desses casos. Para as mulheres, são agrupados os dados referentes a 73.7% dos 21.066 casos registados no ano de 2010. As probabilidades usadas na geração dos dados encontram-se na Tabela 5 e representam a percentagem de cada uma das patologias relativamente a um total de 34.795 casos que se encontram discriminados por patologia ( $34795 = 0.751 * 25.658 + 0.737 * 21.066$ ). Por exemplo, o valor de 11% para a patologia 3, “Pulmão”, resulta da divisão do número total de casos, 3.789 (2.925 para os homens e 864 para as mulheres) por 34.795, o total de casos tipificados.

*Tabela 5 - Probabilidade considerada para cada patologia*

<b>Código</b>	<b>Patologia</b>	<b>Homens</b>	<b>Mulheres</b>	<b>Total</b>	<b>Probabilidade</b>
1	Laringe	590	-	590	2%
2	Esófago	462	-	462	1%
3	Pulmão	2.925	864	3.789	11%
4	Estômago	1.770	1.180	2.950	8%
5	Rim	641	-	641	2%
6	Cólon	2.899	2.149	5.048	15%
7	Bexiga	1.411	-	1.411	4%
8	Reto	1.514	906	2.420	7%
9	Próstata	6.081	-	6.081	17%
10	Linfoma não <i>Hodgkin</i>	975	843	1.818	5%
11	Tiroide	-	1.306	1.306	4%
12	Mama	-	6.552	6.552	19%
13	Corpo do Útero	-	990	990	3%
14	Colo do Útero	-	737	737	2%
<b>Total</b>	-	<b>19.269</b>	<b>15.526</b>	<b>34.795</b>	<b>100%</b>

## 4. Metodologia

Nesta secção apresentam-se dois modelos de Programação Linear Inteira para formular o problema descrito, que apenas diferem na função objetivo.

### Notação:

Para a formulação dos dois modelos usou-se a seguinte notação:

$$P_1 = \{\text{pacientes do tipo 1 a iniciar tratamentos}\};$$

$$P_2 = \{\text{pacientes do tipo 2 a iniciar tratamentos}\};$$

$$P = \{\text{pacientes a iniciar tratamentos}\} = P_1 \cup P_2;$$

$$E = \{\text{pacientes em tratamento durante o período de escalonamento}\};$$

$n$  – número total de turnos de um dia;

$$T = \{\text{turnos por dia}\} = \{1, 2, \dots, n\};$$

$$D = \{\text{dias úteis}\} = \{1, 2, 3, 4, 5\};$$

$$D_p = \{\text{dias em que o paciente } p \text{ está em tratamento}\}, D_p \subset D, p \in P \cup E;$$

$$T_p = \{\text{turnos atribuídos ao paciente } p\}, T_p \subset T, p \in E;$$

$c_p$  – duração do tratamento do paciente  $p$ ;

$$c_p = \begin{cases} 10, & \text{se o paciente } p \text{ for do Tipo 1} \\ 20, & \text{se o paciente } p \text{ for do Tipo 2} \end{cases}$$

$v_p^{td}$  – penalização associada ao escalonamento do paciente  $p$  no turno  $t$  do dia  $d$ ;

Variáveis:

$$x_p^{td} = \begin{cases} 1, & \text{se o paciente } p \text{ for afeto ao turno } t \text{ do dia } d \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, p \in P \cup E, t \in T, d \in D.$$

Restrições:

$$\left[ \begin{array}{ll} \sum_{p \in P \cup E} x_p^{td} \leq 1 & t \in T; d \in D \quad (1) \\ \sum_{t \in T} x_p^{td} = 1 & p \in P_1; d \in D_p \quad (2) \\ \sum_{t \in T} x_p^{td} = 2 & p \in P_2; d \in D_p \quad (3) \\ x_p^{td} \leq x_p^{td+1} & p \in P; t \in T; d \in D_p \setminus \{5\} \quad (4) \\ -x_p^{t-1d} + x_p^{td} - x_p^{t+1d} \leq 0 & p \in P_2; t = 2, \dots, n-1; d \in D_p \quad (5) \\ -x_p^{n-1d} + x_p^{nd} \leq 0 & p \in P_2; d \in D_p \quad (6) \\ x_p^{1d} - x_p^{2d} \leq 0 & p \in P_2; d \in D_p \quad (7) \\ \sum_{p \in E} \sum_{d \in D \setminus D_p} \sum_{t \in T} x_p^{td} = 0 & (8) \\ \sum_{p \in E} \sum_{d \in D_p} \sum_{t \in T \setminus T_p} x_p^{td} = 0 & (9) \\ \sum_{p \in E} \sum_{d \in D_p} \sum_{t \in T_p} x_p^{td} = 1 & (10) \\ x_p^{td} \in \{0,1\} & p \in P \cup E, t \in T, d \in D \quad (11) \end{array} \right.$$

O primeiro grupo de restrições garante que cada turno da escala, só pode, no máximo, ser ocupado por 1 paciente. No segundo grupo de restrições está assegurado que, para a inserção na escala de um paciente cujo tratamento tem a duração de 10 minutos (Tipo 1), é necessário existir um turno disponível. No mesmo sentido, o terceiro grupo de restrições garante que para a inserção na escala de um paciente cujo tratamento tem a duração de 20 minutos (Tipo 2), é necessário existirem dois turnos disponíveis na escala, no mesmo dia. O quarto grupo de restrições garante que um paciente, quando inserido num determinado turno do dia para efetuar os seus tratamentos, fica alocado a esse turno nos dias seguintes. O quinto, sexto e sétimo grupos de restrições forçam a consecutividade dos dois turnos atribuídos a pacientes com tratamentos longos (Tipo 2). Existe a necessidade de distinguir este conjunto de restrições para o último turno do dia (6) e para o primeiro turno do dia (7). No oitavo e nono grupos de restrições, é assegurado que os turnos dos vários dias que não são ocupados por pacientes cujos tratamentos se encontrem a decorrer, estão disponíveis para serem ocupados por novos pacientes. Pelo contrário, o décimo grupo de restrições garante que os turnos dos vários dias ocupados por pacientes já presentes na escala, não podem ser ocupados por novos pacientes. Por fim, no décimo primeiro grupo de restrições, é definido o âmbito das variáveis como sendo binário.

Os modelos distinguem-se pelos objetivos que prosseguem.

Função Objetivo (Modelo A):

De forma a que os tratamentos longos (20 minutos de duração) sejam escalonados para os primeiros turnos, minimiza-se o valor obtido pelo produto do índice do turno pela duração dos tratamentos. Desta forma promove-se o escalonamento de tratamentos longos para mais cedo e os tratamentos curtos para mais tarde.

$$\text{Min } Z_A = \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} t c_p x_p^{td}$$

Função Objetivo (Modelo B):

De modo a escalonar tratamentos a patologias semelhantes em turnos próximos foi utilizado o modelo [11]. Contudo, para que fosse possível a comparação de metodologias, foi necessário adaptar o modelo considerando dois tipos de pacientes.

$$\text{Min } Z_B = \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} v_p^{td} x_p^{td}$$

## **5. Teste dos Modelos**

Para testar os modelos com uma instância de uma dimensão razoável, foram utilizados o *Visual Basic for Applications* (VBA) e o *OpenSolver*. A primeira funcionalidade, permite desenvolver um programa que escreve um modelo de forma a ser resolvido pelo *OpenSolver*. O programa desenvolvido pede os dados referentes à dimensão da instância, isto é, a definição do número de pacientes, do número de turnos por dia e do número de dias a considerar para o escalonamento. Numa segunda fase, requer a informação sobre cada um dos pacientes, ou seja, o tipo, a patologia, o dia em que inicia ou termina os tratamentos e, os turnos que ocupa na escala para os pacientes que já se encontram a realizar tratamentos.

Usando o processo descrito na secção 3.3, foi gerada uma instância de teste com 25 pacientes, 42 turnos por dia e 5 dias. O número de turnos considerado equivale a um horário das 8h até às 16h, com um intervalo de uma hora entre as 13h e as 14h.

As tabelas 6 e 7 discriminam a informação referente aos pacientes.

Tabela 6 - Informação para pacientes já presentes na escala (Instância de Teste)

	Turno	Dia de conclusão	Tipo	Patologia
Paciente 16	26	3	2	14 - Colo do Útero
Paciente 17	31	5	1	4 - Estômago
Paciente 18	40	2	2	12 - Mama
Paciente 19	15	5	1	3 - Pulmão
Paciente 20	35	5	1	7 - Bexiga
Paciente 21	33	5	1	4 - Estômago
Paciente 22	10	5	2	6 - Cólon
Paciente 23	24	5	1	12 - Mama
Paciente 24	3	5	1	10 - Linfoma não <i>Hodgkin</i>
Paciente 25	6	5	2	11 - Tireoide

A tabela 6 apresenta as características dos 10 pacientes já em tratamento enquanto a tabela 7 contém os dados dos 15 pacientes a iniciar tratamentos na semana em questão.

Tabela 7 - Informação para pacientes a inserir na escala (Instância de Teste)

	Dia de início	Tipo	Patologia
Paciente 1	2	1	12 - Mama
Paciente 2	1	1	7 - Bexiga
Paciente 3	3	1	14 - Colo do Útero
Paciente 4	4	2	7 - Bexiga
Paciente 5	3	2	6 - Cólon
Paciente 6	2	1	4 - Estômago
Paciente 7	1	1	10 - Linfoma não <i>Hodgkin</i>
Paciente 8	5	2	9 - Próstata
Paciente 9	2	1	9 - Próstata
Paciente 10	5	2	9 - Próstata
Paciente 11	4	2	10 - Linfoma não <i>Hodgkin</i>
Paciente 12	1	2	5 - Rim
Paciente 13	4	1	3 - Pulmão
Paciente 14	3	1	13 - Corpo do Útero
Paciente 15	3	1	12 - Mama

Tal como no exemplo apresentado na secção 3.2, começou-se por considerar todos os pacientes que já se encontram a efetuar tratamentos. No Anexo A, é apresentada a escala inicial a partir da qual se irá proceder à alocação de todos os novos pacientes aos turnos disponíveis para o efeito.

Reunidas todas as informações indispensáveis para a realização de um escalonamento, procedeu-se à utilização do programa desenvolvido em VBA e, posteriormente, do *OpenSolver*.

Foram utilizadas três abordagens: o modelo A, o modelo B e a tentativa de conciliar os objetivos definidos pelos dois modelos. O resultado da primeira abordagem, ou seja, a escala final correspondente encontra-se no Anexo B, da segunda no Anexo C e, por fim, da terceira resultam dois cenários apresentados nos Anexos D e E.

## 5.1 Análise de resultados

Em primeiro lugar, foram analisados os resultados obtidos pelo modelo A. As unidades para este modelo foram definidas em função dos tempos de tratamento de forma a dispor na escala, na medida do possível, os tratamentos longos no início do dia. Para esta abordagem, o valor alcançado para a função objetivo foi 12.130 unidades. Na segunda abordagem, utilização do modelo B, antes de se chegarem aos resultados foi necessário definir as penalizações  $v_p^{td}$ . As penalizações foram as utilizadas no projeto anterior [11], incorporando dois novos valores,  $v_p^{td} = 20$  e  $v_p^{td} = 30$ . Estes valores encontram-se na tabela 8.

Tabela 8 - Definição das penalizações para o modelo B

Penalizações	Descrição
$v_p^{td} = 15$	Se o paciente for inserido num turno que suceda um paciente com uma patologia semelhante
$v_p^{td} = 20$	Se o paciente for inserido num turno que anteceda um paciente com uma patologia semelhante
$v_p^{td} = 30$	Se o paciente for inserido num turno que suceda um paciente com uma patologia semelhante e anteceda um paciente com uma patologia diferente (e vice-versa)
$v_p^{td} = 45$	Se o paciente for inserido num turno que suceda uma vaga na escala
$v_p^{td} = 60$	Se o paciente for inserido num turno que suceda um paciente com uma patologia diferente

Para esta abordagem, o valor alcançado para a função objetivo foi 2.330 unidades.

A comparação direta entre os resultados dos dois modelos é difícil pois apesar de ambas as unidades das funções objetivo serem relativas a penalidades, não têm a mesma métrica. Contudo, como os modelos definem a mesma região admissível, podem calcular-se o ponto ideal (12130, 2330) e o ponto de nadir (17990, 2980), ambos com duas coordenadas: a primeira referente ao valor da função objetivo do modelo A e a segunda referente ao valor da função objetivo do modelo B. Os valores constam da tabela 9 que apresenta, na segunda linha, os valores das funções objetivo dos dois modelos, na solução ótima do modelo A e, na terceira linha, os valores da função correspondentes à solução do modelo B.

Tabela 9 - Resultados para o escalonamento com modelos em separado

	$Z_A$	$Z_B$
<b>Solução ótima modelo A: <math>x_A^*</math></b>	12 130	2 980
<b>Solução ótima modelo B: <math>x_B^*</math></b>	17 990	2 330

O ponto ideal, corresponde aos melhores valores alcançados para a função objetivo de cada um dos modelos quando a otimização é feita tendo em consideração apenas um dos modelos. Por outro lado, o ponto nadir corresponde aos valores alcançados para a função objetivo de cada modelo quando a otimização é feita atendendo apenas ao outro modelo. Do ponto de vista do funcionamento do serviço, é de extrema importância que se tenha uma visão sobre a forma como os dois objetivos se podem conjugar e se, essa interação traz benefícios para a elaboração das escalas semanais de tratamentos.

Com o intuito de avaliar a vantagem de conjugar as duas abordagens puras, foi inserida uma restrição adicional em cada um dos modelos que pretende limitar os valores obtidos para a função objetivo do outro modelo. Ou seja, para o modelo A, inseriu-se no conjunto de restrições a restrição  $Z_B \leq M$ , sendo  $M$  o valor máximo admissível para o valor da função objetivo do modelo B. No mesmo sentido, para o modelo B, incluiu-se  $Z_A \leq M$ . Assim, voltaram-se a correr ambos os modelos de forma a verificar qual seria o impacto nas funções objetivo desta tentativa de combinar as duas estratégias.

Tabela 10 – Otimização do modelo B com restrição ao valor do objetivo do modelo A

	Restrição	Valor da Função Objetivo		Distância ao ótimo do modelo	
		$Z_A$	$Z_B$	A: $Z_A - 12\ 130$	B: $Z_B - 2330$
Esc. 3	$Z_A \leq 13\ 000$	12 910	2 550	780	220
	$Z_A \leq 15\ 000$	15 000	2 440	2 870	110
	$Z_A \leq 17\ 990$	17 990	2 330	5 860	0

A tabela 10 apresenta três possibilidades tidas em linha de conta quando se correu novamente o modelo B, limitando os valores para a função objetivo do modelo A. De entre as possibilidades apresentadas, decidiu-se construir o escalonamento que limita a 15.000 unidades o valor da função objetivo do modelo A. Este escalonamento é apresentado no Anexo D e representa um impacto negativo de 2.870 unidades (24%) para o modelo A e de 110 unidades (5%) para o modelo B, quando comparados os resultados com aqueles que foram obtidos correndo os dois modelos separadamente.

Tabela 11 – Otimização do modelo A com restrição ao valor do objetivo do modelo B

	Restrição	Valor da Função Objetivo		Distância ao ótimo do modelo	
		$Z_B$	$Z_A$	A: $Z_A - 12\ 130$	B: $Z_B - 2330$
Esc. 4	$Z_B \leq 2\ 400$	2 395	15 570	3 440	65
	$Z_B \leq 2\ 500$	2 500	13 790	1 660	170
	$Z_B \leq 2\ 980$	2 980	12 130	0	650

No mesmo sentido, limitando os valores da função objetivo do modelo B e correndo novamente o modelo A, foram avaliadas as possibilidades apresentadas na tabela 11. De entre as três opções foi construído o escalonamento que limita a 2.500 unidades o valor

da função objetivo do modelo B. Este escalonamento é apresentado no Anexo E e representa um impacto negativo de 170 unidades (7%) para o modelo B e de 1.660 unidades (14%) para o modelo A, quando comparados os resultados com aqueles que foram obtidos correndo os dois modelos separadamente.

Desta forma ficam apresentadas as três abordagens seguidas para a construção das quatro escalas finais. Como as características dos pacientes foram geradas aleatoriamente, pode haver algumas dissonâncias quando se faz uma comparação direta entre os escalonamentos semanais aqui apresentados e aqueles que se podem observar no serviço de Radioterapia do Hospital da Luz. Ainda assim, tentou-se que, na medida do possível, as escalas geradas fossem próximas da realidade presenciada no Hospital.

Resumindo, a tabela 12 apresenta as informações para as quatro escalas construídas.

*Tabela 12 - Resumo resultados para a instância de teste*

	<b>Função Objetivo (modelo A)</b>	<b>Função Objetivo (modelo B)</b>	<b>Anexo</b>
<b>Escalonamento 1</b>	12 130	2 980	B
<b>Escalonamento 2</b>	17 990	2 330	C
<b>Escalonamento 3</b>	15 000	2 440	D
<b>Escalonamento 4</b>	13 790	2 500	E

## **6. Conclusões e Perspetivas de trabalho futuro**

No presente projeto procurou-se usar os conhecimentos de Investigação Operacional para estabelecer um escalonamento num serviço hospitalar com recursos técnicos de última geração.

Embora os principais objetivos que foram propostos tenham sido alcançados, naturalmente que ao longo de todo o processo foram seguidos pressupostos e feitas considerações, de forma a simplificar o problema abordado, que se traduzem em limitações. Em primeiro lugar, não foi possível fazer o tratamento de fatores não quantitativos como atrasos e faltas que têm impacto na escala e, sobretudo, podem atrasar todo o processo de tratamentos dos pacientes. Para além desta questão, não foi considerada a possibilidade de os pacientes poderem ter preferências em relação ao horário a que são alocados para a realização dos tratamentos. Por fim, não foi desenvolvido nenhum tipo de programa de fácil utilização para os principais interessados (técnicos do serviço) que permita uma visualização da escala semanal programada.

Neste sentido, considerando as limitações referidas, existe ainda muito trabalho a realizar. Seria relevante perceber e medir o impacto que a inserção de mais um acelerador linear no serviço teria no escalonamento semanal dos pacientes. Seria também útil medir o impacto que um atraso ou falta de um determinado paciente tem na escala diária e a forma como essa situação penaliza os restantes pacientes em relação aos horários de tratamento. Por fim, seria benéfico o desenvolvimento de uma ferramenta que conseguisse replicar o funcionamento da ferramenta utilizada no

Hospital para a marcação e escalonamento de todos os pacientes do serviço. Essa ferramenta teria como principal objetivo, fornecer o escalonamento mediante a informação sobre pacientes a inserir na escala e pacientes cujos tratamentos já se encontrem a decorrer.

## 7. Referências Bibliográficas

- [1] Alistair, C., & Annie, T. (2013). *Rescheduling nursing shifts:scoping the challenge and examinig the potencial of mathematical model based tools*. Journal of Nursing Management, 23, 411-420.
- [2] Brecht, C., Erik, D., & Jeroen, B. (2010). *Operating room planning and scheduling: A literature review*. European Journal of Operational Research, 201, 921-932.
- [3] Broos, M., & Mario, V. (2011). *An evolutionary approach for the nurse rerostering problem*. Computers & Operations Research, 38, 1400-1411.
- [4] Conforti, D., Guerriero, F., & Guido, R. (2010). *Non-block scheduling with priority for radiotherapy treatments*. European Journal of Operational Research, 201, 289-296.
- [5] Dinh-Nguyen, P., & Andreas, K. (2008). *Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem*. European Journal of Operational Research, 185, 1011-1025.
- [6] Direção Geral da Saúde. (consultado em Abril 2017). "Portugal - Doenças Oncológicas em Números - 2015". Obtido em <https://www.dgs.pt/em-destaque/portugal-doencas-oncologicas-em-numeros-201511.aspx>
- [7] Petrovic, S., & Pedro, L.-R. (2008). *Constructive and GRASP Approaches to Radiotherapy Treatment Schedulling*. Advances in Electrical and Electronics Engineering - IAENG Special Edition of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 . 192 - 200.

- [8] Dobrila, P., Mohammad , P., & Sanja , P. (2011). *Multi-objective genetic algorithms for scheduling of radiotherapy treatments for categorised cancer patients*. Expert Systems with Applications, 38, 6994-7002.
- [9] Edmund, K., Pedro, L.-R., & Sanja, P. (2011). *An Integer Linear Programming Model for the Radiotherapy Treatment Scheduling Problem*. Automated Scheduling, Optimisation and Planning (ASAP) research group. School of Computer Science. University of Nottingham. Nottingham, Reino Unido.
- [10] Hospital da Luz. (consultado em Fevereiro de 2017). *Hospital da Luz - Radioterapia*. Obtido em <http://www.hospitaldaluz.pt/lisboa/pt/centros-especializados/centro-de-oncologia/tratamentos-oncologicos/radioterapia/>
- [11] Oliveira , M. (2015). "Escalonamento de Pacientes de Radioterapia". Trabalho de Final de Mestrado. Mestrado em Decisão Económica e Empresarial. ISEG. Universidade de Lisboa
- [12] Registo Oncológico do Norte. (2010). *"Registo Oncológico Nacional 2010"*.
- [13] Truword, K., Olivier, C., Colin, R., & Dobrila, P. (2008). *A review of scheduling problems in radiotherapy*. Proceedings of the Eighteenth International Conference on Systems Engineering (ICSE2006). 201 - 207.
- [14] Zaghian, M., Lim, G., & Khabazian, A. (2018). *A chance-constrained programming framework to handle uncertainties in radiation therapy treatment plannig*. European Journal of Operational Research, 266, 736-745.

## 8. Anexos

### 8.1 Anexo A – Escala Inicial

		Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-Feira
1	08:00					
2	08:10					
3	08:20	Paciente 24 (Linfoma não Hodgkin)				
4	08:30					
5	08:40					
6	08:50	Paciente 25 (Tiróide)				
7	09:00	Paciente 25 (Tiróide)				
8	09:10					
9	09:20					
10	09:30	Paciente 22 (Cólon)				
11	09:40	Paciente 22 (Cólon)				
12	09:50					
13	10:00					
14	10:10					
15	10:20	Paciente 19 (Pulmão)				
16	10:30					
17	10:40					
18	10:50					
19	11:00					
20	11:10					
21	11:20					
22	11:30					
23	11:40					
24	11:50	Paciente 23 (Mama)				
25	12:00					
26	12:10	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)		
27	12:20	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)		
28	12:30					
29	12:40					
30	12:50					
31	14:00	Paciente 17 (Estômago)				
32	14:10					
33	14:20	Paciente 21 (Estômago)				
34	14:30					
35	14:40	Paciente 20 (Bexiga)				
36	14:50					
37	15:00					
38	15:10					
39	15:20					
40	15:30	Paciente 18 (Mama)	Paciente 18 (Mama)			
41	15:40	Paciente 18 (Mama)	Paciente 18 (Mama)			
42	15:50					

## 8.2 Anexo B – Escalonamento 1

		Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-Feira
1	08:00	Paciente 12 (Rim)				
2	08:10	Paciente 12 (Rim)				
3	08:20	Paciente 24 (Linfoma não Hodgkin)				
4	08:30				Paciente 4 (Bexiga)	Paciente 4 (Bexiga)
5	08:40				Paciente 4 (Bexiga)	Paciente 4 (Bexiga)
6	08:50	Paciente 25 (Tiróide)				
7	09:00	Paciente 25 (Tiróide)				
8	09:10			Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)
9	09:20			Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)
10	09:30	Paciente 22 (Cólon)				
11	09:40	Paciente 22 (Cólon)				
12	09:50	Paciente 2 (Bexiga)				
13	10:00	Paciente 7 (Linfoma não Hodgkin)				
14	10:10		Paciente 9 (Próstata)	Paciente 9 (Próstata)	Paciente 9 (Próstata)	Paciente 9 (Próstata)
15	10:20	Paciente 19 (Pulmão)				
16	10:30				Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)	Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)
17	10:40				Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)	Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)
18	10:50		Paciente 6 (Estômago)	Paciente 6 (Estômago)	Paciente 6 (Estômago)	Paciente 6 (Estômago)
19	11:00				Paciente 4 (Bexiga)	Paciente 4 (Bexiga)
20	11:10				Paciente 4 (Bexiga)	Paciente 4 (Bexiga)
21	11:20			Paciente 14 (Corpo do Útero)	Paciente 14 (Corpo do Útero)	Paciente 14 (Corpo do Útero)
22	11:30		Paciente 1 (Mama)	Paciente 1 (Mama)	Paciente 1 (Mama)	Paciente 1 (Mama)
23	11:40			Paciente 3 (Colo do Útero)	Paciente 3 (Colo do Útero)	Paciente 3 (Colo do Útero)
24	11:50	Paciente 23 (Mama)				
25	12:00					Paciente 8 (Próstata)
26	12:10	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)		Paciente 8 (Próstata)
27	12:20	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)		Paciente 10 (Próstata)
28	12:30					Paciente 10 (Próstata)
29	12:40				Paciente 13 (Pulmão)	Paciente 13 (Pulmão)
30	12:50			Paciente 15 (Mama)	Paciente 15 (Mama)	Paciente 15 (Mama)
31	14:00	Paciente 17 (Estômago)				
32	14:10					
33	14:20	Paciente 21 (Estômago)				
34	14:30					
35	14:40	Paciente 20 (Bexiga)				
36	14:50					
37	15:00					
38	15:10					
39	15:20					
40	15:30	Paciente 18 (Mama)	Paciente 18 (Mama)			
41	15:40	Paciente 18 (Mama)	Paciente 18 (Mama)			
42	15:50					

Ativar  
Aceda

### 8.3 Anexo C – Escalonamento 2

		Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-Feira
1	08:00				Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)	Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)
2	08:10				Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)	Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)
3	08:20	Paciente 24 (Linfoma não Hodgkin)				
4	08:30	Paciente 7 (Linfoma não Hodgkin)				
5	08:40					
6	08:50	Paciente 25 (Tiróide)				
7	09:00	Paciente 25 (Tiróide)				
8	09:10					
9	09:20					
10	09:30	Paciente 22 (Cólon)				
11	09:40	Paciente 22 (Cólon)				
12	09:50			Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)
13	10:00			Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)
14	10:10					
15	10:20	Paciente 19 (Pulmão)				
16	10:30				Paciente 13 (Pulmão)	Paciente 13 (Pulmão)
17	10:40		Paciente 9 (Próstata)	Paciente 9 (Próstata)	Paciente 9 (Próstata)	Paciente 9 (Próstata)
18	10:50					
19	11:00				Paciente 4 (Bexiga)	Paciente 4 (Bexiga)
20	11:10				Paciente 4 (Bexiga)	Paciente 4 (Bexiga)
21	11:20					
22	11:30					
23	11:40		Paciente 1 (Mama)	Paciente 1 (Mama)	Paciente 1 (Mama)	Paciente 1 (Mama)
24	11:50	Paciente 23 (Mama)				
25	12:00			Paciente 15 (Mama)	Paciente 15 (Mama)	Paciente 15 (Mama)
26	12:10	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)		
27	12:20	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)		
28	12:30			Paciente 3 (Colo do Útero)	Paciente 3 (Colo do Útero)	Paciente 3 (Colo do Útero)
29	12:40	Paciente 12 (Rim)				
30	12:50	Paciente 12 (Rim)				
31	14:00	Paciente 17 (Estômago)				
32	14:10		Paciente 6 (Estômago)	Paciente 6 (Estômago)	Paciente 6 (Estômago)	Paciente 6 (Estômago)
33	14:20	Paciente 21 (Estômago)				
34	14:30					
35	14:40	Paciente 20 (Bexiga)				
36	14:50	Paciente 2 (Bexiga)				
37	15:00					
38	15:10			Paciente 14 (Corpo do Útero)	Paciente 14 (Corpo do Útero)	Paciente 14 (Corpo do Útero)
39	15:20					Paciente 10 (Próstata)
40	15:30	Paciente 18 (Mama)	Paciente 18 (Mama)			Paciente 10 (Próstata)
41	15:40	Paciente 18 (Mama)	Paciente 18 (Mama)			Paciente 8 (Próstata)
42	15:50					Paciente 8 (Próstata)

## 8.4 Anexo D – Escalonamento 3

		Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-Feira
1	08:00	Paciente 12 (Rim)				
2	08:10	Paciente 12 (Rim)				
3	08:20	Paciente 24 (Linfoma não Hodgkin)				
4	08:30	Paciente 7 (Linfoma não Hodgkin)				
5	08:40		Paciente 9 (Próstata)	Paciente 9 (Próstata)	Paciente 9 (Próstata)	Paciente 9 (Próstata)
6	08:50	Paciente 25 (Tiróide)				
7	09:00	Paciente 25 (Tiróide)				
8	09:10				Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)	Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)
9	09:20				Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)	Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)
10	09:30	Paciente 22 (Cólon)				
11	09:40	Paciente 22 (Cólon)				
12	09:50			Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)
13	10:00			Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)
14	10:10			Paciente 14 (Corpo do Útero)	Paciente 14 (Corpo do Útero)	Paciente 14 (Corpo do Útero)
15	10:20	Paciente 19 (Pulmão)				
16	10:30				Paciente 13 (Pulmão)	Paciente 13 (Pulmão)
17	10:40					Paciente 10 (Próstata)
18	10:50					Paciente 10 (Próstata)
19	11:00				Paciente 4 (Bexiga)	Paciente 4 (Bexiga)
20	11:10				Paciente 4 (Bexiga)	Paciente 4 (Bexiga)
21	11:20			Paciente 3 (Colo do Útero)	Paciente 3 (Colo do Útero)	Paciente 3 (Colo do Útero)
22	11:30					
23	11:40		Paciente 1 (Mama)	Paciente 1 (Mama)	Paciente 1 (Mama)	Paciente 1 (Mama)
24	11:50	Paciente 23 (Mama)				
25	12:00			Paciente 15 (Mama)	Paciente 15 (Mama)	Paciente 15 (Mama)
26	12:10	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)		Paciente 8 (Próstata)
27	12:20	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)		Paciente 8 (Próstata)
28	12:30					
29	12:40					
30	12:50					
31	14:00	Paciente 17 (Estômago)				
32	14:10		Paciente 6 (Estômago)	Paciente 6 (Estômago)	Paciente 6 (Estômago)	Paciente 6 (Estômago)
33	14:20	Paciente 21 (Estômago)				
34	14:30					
35	14:40	Paciente 20 (Bexiga)				
36	14:50	Paciente 2 (Bexiga)				
37	15:00					
38	15:10					
39	15:20					
40	15:30	Paciente 18 (Mama)	Paciente 18 (Mama)			
41	15:40	Paciente 18 (Mama)	Paciente 18 (Mama)			
42	15:50					

Ativar  
Aceda

## 8.5 Anexo E – Escalonamento 4

		Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-Feira
1	08:00	Paciente 12 (Rim)				
2	08:10	Paciente 12 (Rim)				
3	08:20	Paciente 24 (Linfoma não Hodgkin)				
4	08:30	Paciente 7 (Linfoma não Hodgkin)				
5	08:40		Paciente 9 (Próstata)	Paciente 9 (Próstata)	Paciente 9 (Próstata)	Paciente 9 (Próstata)
6	08:50	Paciente 25 (Tiróide)				
7	09:00	Paciente 25 (Tiróide)				
8	09:10		Paciente 1 (Mama)	Paciente 1 (Mama)	Paciente 1 (Mama)	Paciente 1 (Mama)
9	09:20					
10	09:30	Paciente 22 (Cólon)				
11	09:40	Paciente 22 (Cólon)				
12	09:50			Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)
13	10:00			Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)	Paciente 5 (Cólon)
14	10:10			Paciente 14 (Corpo do Útero)	Paciente 14 (Corpo do Útero)	Paciente 14 (Corpo do Útero)
15	10:20	Paciente 19 (Pulmão)				
16	10:30				Paciente 13 (Pulmão)	Paciente 13 (Pulmão)
17	10:40				Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)	Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)
18	10:50				Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)	Paciente 11 (Linfoma não Hodgkin)
19	11:00				Paciente 4 (Bexiga)	Paciente 4 (Bexiga)
20	11:10				Paciente 4 (Bexiga)	Paciente 4 (Bexiga)
21	11:20					Paciente 8 (Próstata)
22	11:30					Paciente 8 (Próstata)
23	11:40			Paciente 15 (Mama)	Paciente 15 (Mama)	Paciente 15 (Mama)
24	11:50	Paciente 23 (Mama)				
25	12:00					
26	12:10	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)		Paciente 10 (Próstata)
27	12:20	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)	Paciente 16 (Colo do Útero)		Paciente 10 (Próstata)
28	12:30			Paciente 3 (Colo do Útero)	Paciente 3 (Colo do Útero)	Paciente 3 (Colo do Útero)
29	12:40					
30	12:50					
31	14:00	Paciente 17 (Estômago)				
32	14:10		Paciente 6 (Estômago)	Paciente 6 (Estômago)	Paciente 6 (Estômago)	Paciente 6 (Estômago)
33	14:20	Paciente 21 (Estômago)				
34	14:30					
35	14:40	Paciente 20 (Bexiga)				
36	14:50	Paciente 2 (Bexiga)				
37	15:00					
38	15:10					
39	15:20					
40	15:30	Paciente 18 (Mama)	Paciente 18 (Mama)			
41	15:40	Paciente 18 (Mama)	Paciente 18 (Mama)			
42	15:50					

Ativar  
Aceda