



Dissertação

Mestrado em Gestão

***Gestão de projetos repetitivos com incorporação do
efeito de aprendizagem: desenvolvimento de
heurísticas numa análise multiobjetivo***

João Carlos Águeda Grilo

Leiria, março de 2016



Dissertação

Mestrado em Gestão

***Gestão de projetos repetitivos com incorporação do
efeito de aprendizagem: desenvolvimento de
heurísticas numa análise multiobjetivo***

João Carlos Águeda Grilo

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Carlos Manuel Gomes da Silva, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Pedro Manuel Rodrigues Carreira, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, março de 2016

Dedicatória

À minha família, em especial aos meus avós.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos professores Carlos Silva e Pedro Carreira, que na qualidade de orientador e coorientador, respetivamente, me sugeriram este tema de investigação e deram-me a valiosa oportunidade de o abordar utilizando como base o seu modelo de programação matemática multiobjetivo. Agradeço-lhes também por toda a disponibilidade, paciência e motivação que me proporcionaram, assim como pelas suas críticas construtivas e cuidados relativos à estrutura e organização dos conteúdos mas, acima de tudo, pelo espírito de companheirismo que sempre demonstraram.

Agradeço ainda a todos aqueles que contribuíram, de um modo ou de outro, positivamente para a minha dissertação.

Resumo

É amplamente aceite que a produtividade do Homem na execução de tarefas repetitivas aumenta à medida que as mesmas vão sendo efetuadas sucessivamente. Daqui se depreende o porquê de ser muito comum ouvir-se a célebre expressão de que “é a prática que leva à perfeição”. Na gestão de projetos, é costume fazer-se a alusão a esta convicção natural designando-a por *efeito de aprendizagem*.

Reconhecendo a sua importância, esta dissertação terá como questão central o problema da gestão de projetos repetitivos, num contexto em que a possibilidade dos mesmos serem executados em paralelo coexiste com a possibilidade de colher os benefícios resultantes do efeito de aprendizagem. De facto, entrar em linha de conta com o fator aprendizagem poderá contribuir decisivamente para melhorar as estimativas de duração e custo inerentes à execução de vários projetos repetitivos sucessivamente, beneficiando a precisão dos processos de orçamentação e calendarização e, em última instância, promovendo a competitividade negocial das empresas junto dos seus parceiros de negócio/clientes. Este último aspeto torna-se essencial seja qual for a estratégia de negócio que a empresa prossiga.

Sendo claro o interesse deste tema, para concretizar o objetivo desta investigação, foi utilizado um novo modelo de programação matemática multiobjetivo, desenvolvido por Gomes da Silva & Carreira (2016), que considera explicitamente a possibilidade de analisar os *trade-offs* estratégicos entre tempo, custo e qualidade, incidindo simultaneamente sobre o efeito de aprendizagem. Neste modelo, o gestor de projetos terá de determinar o número de equipas que irá executar cada atividade dos vários projetos repetitivos. Esta decisão implica, naturalmente, consequências diretas nas três dimensões referidas anteriormente e é da sua interação tipicamente conflituante que advém a complexidade deste problema.

Devido à complexidade do modelo, foram desenvolvidas e aplicadas quatro *heurísticas* que têm por base algumas *regras de prioridade*, através das quais se pretendeu gerar aproximações à fronteira de Pareto do problema.

As heurísticas foram posteriormente implementadas em dois exemplos específicos, de modo a ilustrar a sua aplicação, e foi possível verificar a sua relevância e capacidade para gerarem uma boa aproximação da fronteira de Pareto. Assim sendo, é necessária investigação adicional, no sentido de averiguar se os resultados aqui alcançados se mantêm válidos para outro tipo de redes e parâmetros.

Palavras-chave: Efeito de aprendizagem; Gestão de projetos; Projetos repetitivos; Programação matemática multiobjetivo; Heurísticas.

Abstract

It is widely recognized that man's productivity in performing repetitive tasks increases as the tasks are performed successively. This explains why it is very common to hear the well-known sentence that "practice makes perfection". In project management, it's usual to designate this natural conviction by *learning effect*.

Assuming its importance, this dissertation has as central question the management of repetitive projects, in a context in which the possibility that they can be executed in simultaneous coexists with the possibility of benefiting from the learning effect. Indeed, taking the learning factor into account may contribute decisively to improve project duration and cost estimates of successive executions of repetitive projects, resulting in a higher precision of budget and schedule and, ultimately, promoting company's competitiveness and negotiation ability among their business partners/customers. This last aspect becomes essential regardless of the company's business strategy.

In order to achieve the objective of this research, it was used a new multiobjective mathematical programming model, developed by Gomes da Silva & Carreira (2016), which explicitly considers the possibility of analyzing the strategic trade-offs between time, cost and quality, while incorporating the learning effect. In this model, the project manager determines the number of teams that are assigned to each activity over the set of repetitive projects to be executed. Naturally, this decision implies direct consequences on the three dimensions mentioned above and it's due of their typically conflicting interaction that results the complexity of the problem.

Given the complexity of the model, four *heuristics* that are based on certain *priority rules* were developed in order to generate approximations to the Pareto frontier of the problem.

The *heuristics* were then implemented in two specific examples, so as to illustrate their application. In both examples, the results suggest that the *heuristics* may be relevant and able to generate a good approximation of the Pareto frontier. Therefore, additional research is needed in order to investigate whether these results remain valid for different project networks and parameters.

Keywords: Learning effect; Project management; Repetitive projects; Multiobjective mathematical programming; Heuristics.

Lista de figuras

Figura 1 - Exemplo de uma curva de aprendizagem com $D_1 = 10000$ e $r = 0,85$	7
Figura 2 – Triângulo de Ferro da gestão de projetos	15
Figura 3 - Exemplo de vários projetos repetitivos e do inter-relacionamento entre as suas atividades. Adaptado de Huang & Sun (2009) e Harris & Ioannou (1998).	27
Figura 4 - Plano de trabalhos para projetos de construção em altura segundo o método de produção vertical (VPM).	29
Figura 5 - Evolução dos métodos de programação a partir do conceito de linha de balanço. Adaptado de Couto & Couto (2010).	29
Figura 6 – Tempos de produção para as unidades 1-8 (o número das unidades é representado entre parêntesis).	31
Figura 7 – X representa a região admissível do problema no espaço (das variáveis) de decisão e Z no espaço dos objetivos.	37
Figura 8 - Exemplo ilustrativo de uma fronteira de Pareto (à esquerda) e de um possível relacionamento entre as soluções (à direita).	38
Figura 9 – Rede do projeto (Exemplo 1).	54
Figura 10 – Aplicação do CPM utilizando-se um total de 18 equipas (Exemplo 1)..	55
Figura 11 – Aplicação do CPM utilizando-se um total de 6 equipas (Exemplo 1)....	56
Figura 12 – Fronteira de Pareto (Exemplo 1).	58
Figura 13 – Possíveis posicionamentos da solução correspondente à utilização de m equipas.	68
Figura 14 – Exemplo 1 da aplicação da heurística 4.	80
Figura 15 - Exemplo 2 da aplicação da heurística 4.	81
Figura 16 – Exemplo 3 da aplicação da heurística 4.	82
Figura 17 – Fronteira de Pareto (Exemplo 2).	96
Figura 18 – Aplicação do CPM utilizando-se um total de 6 equipas (Exemplo 2)..	101

Lista de tabelas

Tabela 1 – Redução percentual comparativamente à repetição imediatamente anterior.	8
Tabela 2 - Abordagens na gestão de multi-projetos.....	21
Tabela 3 – Classificação das abordagens de gestão de multi-projetos.....	22
Tabela 4 – Alguns cenários possíveis para a repartição do número total de variáveis de decisão.	50
Tabela 5 – Algumas soluções possíveis para determinar o vetor do número de equipas.	50
Tabela 6 – Parâmetros das atividades (Exemplo 1).	54
Tabela 7 – Conjunto das soluções não dominadas exatas (Exemplo 1).....	57
Tabela 8 – Experiência computacional com a atribuição de probabilidades uniformes na distribuição do número de equipas.	61
Tabela 9 – Fronteira de Pareto exata e resultado das heurísticas (Exemplo 1).....	94
Tabela 10 – Resumo dos resultados obtidos pela aplicação das heurísticas (Exemplo 1).....	94
Tabela 11 – Parâmetros das atividades (Exemplo 2).	96
Tabela 12 – Conjunto das soluções não dominadas exatas (Exemplo 2).....	96
Tabela 13 - Fronteira de Pareto exata e resultado das heurísticas (Exemplo 2).	107
Tabela 14 - Resumo dos resultados obtidos pela aplicação das heurísticas (Exemplo 2).....	107

Lista de siglas

AD – Agente de decisão

CCV – Contributo crítico válido

CPM – Método do caminho crítico

FP – Fronteira de Pareto

GP – Gestor de projetos

GPR – Gestão de projetos repetitivos

LOB – Linha de balanço

PBO – Organizações baseadas em projetos

RP – Regras de prioridade

Índice

DEDICATÓRIA	III
AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SIGLAS	XV
ÍNDICE	XVII
INTRODUÇÃO	1
PARTE I – ENQUADRAMENTO TEÓRICO	5
1. O efeito de aprendizagem	6
2. Gestão de Projetos	11
2.1 Trade-off estratégico	15
2.2 Gestão de multi-projetos	17
2.3 Gestão de multi-projetos repetitivos com incorporação do efeito de aprendizagem	23
PARTE II – MODELO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA MULTI-OBJECTIVO APLICADO À GPR	33
1. Problemas de programação matemática multiobjetivo	34
1.1 Abordagens na resolução de problemas multiobjetivo	39
1.2 Medidas de avaliação em problemas multiobjetivo	42
2. O modelo	45

2.1 <i>Trade-off</i> estratégico e complexidade do modelo matemático	51
2.2. Casos extremos: ausência de aprendizagem e aprendizagem máxima	53
PARTE III – DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE HEURÍSTICAS PARA A RESOLUÇÃO DO MODELO DE GPR	59
1. Experiência inicial: atribuição de uma distribuição uniforme	60
2. Desenvolvimento, enquadramento e princípios essenciais das heurísticas	63
2.1 Heurística 1: folgas estáticas	70
2.2 Heurística 2: folgas dinâmicas	72
2.3 Heurística 3: duração inicial, folgas dinâmicas e aprendizagem	74
2.4 Heurística 4: contributos críticos válidos	77
3. Aplicação das heurísticas	85
3.1 Exemplo 1	86
3.2 Exemplo 2	96
CONCLUSÃO	109
BIBLIOGRAFIA	113

Introdução

“É fazendo que se aprende a fazer aquilo que se deve aprender a fazer”

Aristóteles (384 – 322 a.C) *in* Ética a Nicômaco

É amplamente reconhecido que o desempenho do Homem na execução de tarefas repetitivas aumenta à medida que as mesmas vão sendo efetuadas sucessivamente. Os motivos utilizados para explicar esse fenómeno são diversos e envolvem fatores como: melhor coordenação e uso de ferramentas, maior familiarização com o trabalho, desenvolvimento de técnicas e de métodos mais eficientes e eficazes, entre outros (Thomas *et al.*, 1986). De facto, a História da Humanidade sempre foi, e ainda o é, caracterizada por uma surpreendente capacidade de evolução e de adaptação a novas circunstâncias.

Neste sentido, é muito frequente ouvirmos a célebre expressão de que “é a prática que leva à perfeição”. De um modo geral, é costume fazer-se a alusão a esta convicção natural designando-a por “efeito de aprendizagem”, o que deu origem ao conceito de *curva de aprendizagem*. Sucintamente, esta última poderá ser definida como a representação matemática do referido efeito, em que o eixo das ordenadas expressa a duração de uma atividade/tarefa e o eixo das abcissas denota o seu número de repetições. Com efeito, o relacionamento entre estas variáveis dá origem a uma curva de declive negativo, pelas razões referidas acima.

Na gênese deste tema, Wright (1936) apresenta-se como sendo uma referência incontornável, dado que constitui o primeiro estudo conhecido acerca da curva de aprendizagem e, em resultado das suas observações, a indústria aeroespacial foi pioneira na introdução do efeito de aprendizagem na gestão dos seus projetos. Desde então, tem-se assistido ao desenvolvimento de um vasto leque de modelos de curva de aprendizagem (ver e.g., Yelle, 1979; Thomas *et al.*, 1986), mas permanecendo sempre o modelo tradicional log-linear de Wright (1936) como sendo o mais popular e utilizado.

Neste contexto, em Teplitz & Amor (1998), encontramos uma afirmação particularmente interessante que aponta para o facto de a maior parte dos benefícios que se podem retirar da aprendizagem ocorrerem nas primeiras unidades produzidas, o que torna os

projetos repetitivos em candidatos privilegiados para a incorporação desse efeito na sua gestão.

Na literatura, talvez o principal argumento para a pertinência de o fazer será porque poderá contribuir decisivamente para melhorar as estimativas de duração e custo inerentes à execução de vários projetos repetitivos sucessivamente (ver e.g., Shtub *et al.*, 1996; Teplitz & Amor, 1998; Couto & Teixeira, 2005; Ammar & Samy, 2015). No fundo, isso permitirá realizar previsões assentes em pressupostos mais realistas. Estas duas últimas referências demonstram ainda que o efeito de aprendizagem pode conduzir a ganhos de produtividade demasiado relevantes para ser menosprezado.

Outro argumento relevante, que advém do anterior, é que tal resultará numa maior precisão dos processos de orçamentação e calendarização, favorecendo a competitividade negocial das empresas junto dos seus parceiros de negócio/clientes (Badukale & Sabihuddin, 2014). Inclusivamente, evidenciando a sua importância, Kerzner (2013) considera o conhecimento da curva de aprendizagem, por parte das empresas, como sendo uma forte vantagem competitiva.

Estes dois motivos essenciais demonstram, naturalmente, a importância da incorporação do efeito de aprendizagem na gestão de projetos repetitivos. Adicionalmente, o interesse deste tema é ainda reforçado pelo facto de ser relativamente escasso o número de publicações sobre o mesmo.

Deste modo, incorporar o efeito de aprendizagem na gestão de projetos repetitivos constituirá a questão central desta dissertação. Para o concretizar, será utilizado um novo modelo de programação matemática multiobjetivo, desenvolvido por Gomes da Silva & Carreira (2016), que considera explicitamente a possibilidade de existirem *trade-offs* entre tempo, custo e qualidade, três dimensões fundamentais na gestão de projetos. De notar que a incorporação do fator aprendizagem implica desafios acrescidos e introduz complexidade adicional ao problema. Neste contexto multiobjetivo, importará determinar as soluções em que não é possível melhorar um dos objetivos sem piorar, pelo menos, um dos restantes. Ao conjunto completo dessas soluções dá-se o nome de *fronteira de Pareto* e constitui o conjunto de decisões mais racionais a adotar pelo gestor de projetos, sendo fácil de compreender o interesse que existe na sua determinação.

De modo a procurar resolver eficientemente este último problema, serão desenvolvidas e aplicadas quatro *heurísticas* que têm por base *regras de prioridade*, exatamente por terem

como objetivo priorizar, de acordo com as suas características, determinadas atividades em detrimento das restantes. Através da sua utilização, pretender-se-á gerar aproximações à fronteira de Pareto do problema. De referir que, na área da gestão de projetos e operações, o recurso a heurísticas é um campo bastante fértil para a pesquisa de soluções que se traduzam num compromisso razoável entre qualidade e esforço na sua obtenção.

Devido a limitações temporais subjacentes à realização desta dissertação (6 meses), as heurísticas aqui desenvolvidas serão aplicadas a apenas dois exemplos para testar a sua pertinência mas, futuramente, tencionar-se-á implementá-las computacionalmente e aferir a sua adequação em problemas maiores, mais complexos e representativos.

Finalmente, merece destaque o facto de ainda não terem sido desenvolvidos métodos geradores da fronteira de Pareto para o modelo multiobjetivo base desta dissertação, referido acima. Assim, atendendo ao que foi dito anteriormente, é justamente sobre este ponto que esta dissertação poderá introduzir a sua mais-valia.

Esta dissertação encontra-se estruturada em três partes, divididas por sua vez em secções. Na primeira parte, é feito o enquadramento teórico sobre as principais temáticas deste estudo. Deste modo, é abordado o efeito de aprendizagem, assim como os conceitos e teorias referentes à gestão de projetos, dando um especial enfoque aos projetos repetitivos.

Na segunda parte, é apresentado o modelo multiobjetivo subjacente a esta dissertação, antecedido pela apresentação da estrutura de um problema de programação matemática multiobjetivo. Serão também apresentados os conceitos de solução eficiente, de solução não dominada, fronteira de Pareto, abordagens na resolução deste tipo de modelos, natureza dos métodos de resolução e medidas de avaliação da qualidade das soluções encontradas. Nesta parte, é ainda ilustrado o impacto do efeito de aprendizagem, utilizando para tal duas situações extremas: ausência de aprendizagem e aprendizagem máxima.

A última parte será dedicada a métodos de geração aproximada da fronteira de Pareto do modelo multiobjetivo descrito na parte II. Serão apresentadas várias heurísticas, consistindo a inicial na geração aleatória de soluções. No sentido de melhorar a qualidade da aproximação, foram propostas quatro heurísticas adicionais. Estas quatro heurísticas serão aplicadas à resolução de dois problemas de projetos repetitivos, tendo por base a mesma rede de projeto, mas parâmetros diferentes.

Parte I – Enquadramento Teórico

Nesta parte ir-se-á apresentar os conceitos fundamentais e aspetos essenciais associados ao efeito de aprendizagem e à gestão de projetos. Relativamente ao efeito de aprendizagem, será apresentado o modelo matemático log-linear e os pressupostos subjacentes à sua aplicação. Sobre a gestão de projetos, será explorado o *trade-off* estratégico entre tempo, custo e desempenho, sendo também apresentado o conceito de multi-projetos e as principais abordagens na sua gestão. Por fim, far-se-á uma pequena revisão de literatura sobre a incorporação do efeito de aprendizagem na gestão de projetos repetitivos.

1. O efeito de aprendizagem

Os seres humanos têm a capacidade de aprender. No que diz respeito a esta dissertação, por efeito de aprendizagem entenda-se uma possível redução na duração ou custo de uma determinada atividade, em resultado de a mesma ser executada sucessivamente e nas mesmas circunstâncias, sempre por um mesmo colaborador ou equipa de colaboradores. Assim, conforme referido em Couto & Teixeira (2005), considerar o efeito de aprendizagem ao desempenhar uma atividade é o mesmo que assumir um aumento nos níveis de produtividade a partir de um certo número de vezes em que a mesma é repetida. Tal aumento deve verificar-se, pelo menos, durante algumas repetições subsequentes. Adicionalmente, Amor & Teplitz (1998) referem que o efeito de aprendizagem se encontra em praticamente tudo o que fazemos e explicam-no pelo facto de à medida que vamos ganhando prática e experiência na realização de uma atividade, a mesma vai demorando cada vez menos tempo a ser executada, dado que temos vindo a antecipar o que terá de ser feito e provavelmente encontrámos a forma mais eficaz e eficiente de completar todas as tarefas adstritas a essa atividade. De facto, como é referido em Chase *et al.* (1995), “é a prática que leva à perfeição”. É ainda de notar que o efeito de aprendizagem é um fenómeno transversal e tem sido alvo de investigação em inúmeras indústrias (Xu & Ding, 2015).

Neste contexto, o primeiro estudo conhecido acerca da curva de aprendizagem remonta a 1936 e foi preconizado por Theodore Paul Wright, engenheiro aeronáutico, que concluiu a existência de uma taxa de aprendizagem de 80% na construção de aeronaves. Em resultado das suas observações, a indústria aeroespacial foi pioneira na incorporação do efeito de aprendizagem na gestão dos seus projetos. Interessa agora perceber como deve ser interpretado o valor da taxa de aprendizagem anteriormente referido. Para tal, torna-se importante explicitar o que se entende por curva de aprendizagem e quais os seus três pressupostos. Neste sentido, segundo Chase *et al.* (1995), a teoria da curva de aprendizagem é baseada nos três pressupostos seguintes:

1. O tempo necessário para completar uma determinada tarefa ou unidade de um produto será menor cada vez que o processo de realizar essa tarefa ou esse produto é repetido;
2. A diminuição da duração, referida acima, deverá evoluir a um ritmo decrescente à medida que o número de repetições se vai sucedendo;
3. A redução na duração deverá seguir um padrão previsível.

Na literatura existem vários modelos matemáticos de curvas de aprendizagem, sendo que o mais frequentemente utilizado é o modelo log-linear e, pela sua fácil aplicabilidade e simplicidade, será precisamente este que será utilizado nesta dissertação.

A curva de aprendizagem do modelo log-linear é obtida fazendo depender a duração das atividades, pelo tempo necessário para as executar pela primeira vez e pela taxa de aprendizagem definida. Assim, a respetiva curva é expressa do seguinte modo:

$$D_x = D_1 * x^{\frac{\log r}{\log 2}} \quad (1)$$

onde D_x representa, portanto, a duração esperada da x-ésima execução, D_1 corresponde à duração necessária para executar a atividade pela primeira vez e o parâmetro r diz respeito à taxa de aprendizagem estabelecida. De notar que se a curva de aprendizagem do modelo (1) for desenhada em coordenadas logarítmicas, obtém-se uma linha reta com declive negativo (Lutz *et al.*, 1994).

Assim, o primeiro e principal pressuposto por detrás do conceito de curva de aprendizagem assenta na convicção natural de que as pessoas veem o seu desempenho aumentar na execução de uma tarefa à medida que a mesma é repetida consecutivamente. Tal princípio pode ser facilmente constatado na Figura 1, que representa um exemplo de uma curva de aprendizagem obtida através da equação (1). Em Chase *et al.* (1995) podemos encontrar a seguinte definição referente à mesma:

Definição 1 (Curva de aprendizagem) *Uma curva de aprendizagem evidencia a relação entre a duração de uma atividade e o número de vezes que a mesma é executada sucessivamente.*

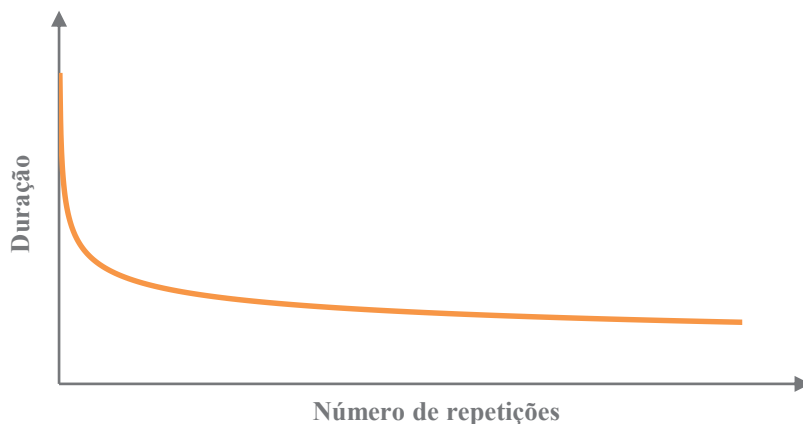


Figura 1 - Exemplo de uma curva de aprendizagem com $D_1 = 10000$ e $r = 0,85$.

Neste exemplo, é perfeitamente visível que conforme as várias repetições se vão sucedendo, a duração unitária por repetição tende a diminuir, apesar de ser a um ritmo decrescente. Esta última constatação representa o segundo pressuposto das curvas de aprendizagem que determina que o decréscimo na duração ocorre a ritmo cada vez mais lento à medida que, neste caso, caminhamos ao longo do eixo das abcissas que representa o número de repetições. Esta situação é perceptível na Tabela 1, referente à figura anterior. De facto, podemos observar que nas repetições mais elevadas o efeito de aprendizagem conduz a reduções muito pouco pronunciadas.

Repetição N°:	Duração	Redução (%)
1	10000,0	-
2	8500,0	15,00%
3	7729,1	9,07%
...	-	-
100	3396,8	-
101	3388,9	0,23%
...	-	-
500	2329,1	-
501	2328,0	0,05%
...	-	-
999	1980,2	-
1000	1979,7	0,02%

Tabela 1 – Redução percentual comparativamente à repetição imediatamente anterior.

É exatamente devido a esta observação que Teplitz & Amor (1998) referem que é um erro comum considerar que o efeito de aprendizagem é apenas relevante para situações de produção em massa. Neste sentido, estes autores referem que a grande maioria dos benefícios que se podem retirar da aprendizagem ocorrem precisamente nas primeiras unidades produzidas, fazendo com que os projetos de natureza repetitiva sejam candidatos privilegiados para a incorporação do efeito de aprendizagem na sua gestão. Este último assunto será abordado mais à frente, na secção 2.3 – Parte I, e constitui o foco principal desta dissertação.

Relativamente ao terceiro pressuposto, este determina que, ao ocorrer uma redução na duração de uma atividade, essa deve seguir um determinado padrão previsível que dependerá, evidentemente, do modelo matemático utilizado para representar a curva de aprendizagem. Como já foi referido anteriormente, neste estudo será utilizado o modelo log-linear mas outros modelos matemáticos podem ser encontrados na literatura, incluindo, por

exemplo, a função definida por partes, o modelo cúbico, o exponencial e as curvas de *Boeing* (para uma leitura mais aprofundada, ver Yelle, 1979; Thomas *et al.*, 1986; Couto & Teixeira, 2004). É, ainda, de realçar que, de acordo com o estudo de Everett & Farghal (1994), o modelo log-linear é o que evidencia melhor capacidade para realizar previsões, enquanto que o modelo cúbico proporciona melhor correlação com a informação histórica. Assim, o último pressuposto não é facilmente identificado, nem na Figura 1 nem na Tabela 1, e para o perceber é conveniente explicar o que se entende por *efeito de duplicação* e como evoluem as durações das atividades no modelo log-linear.

No que diz respeito ao efeito de duplicação, que advém do inglês *doubling effect*, podemos observar a seguinte noção em Teplitz & Amor (1998):

Definição 2 (Efeito de duplicação) *O efeito de duplicação sugere que uma redução percentual constante, no tempo necessário para desempenhar uma atividade, pode ser esperada com cada duplicação do número de vezes em que a mesma é executada.*

Com efeito, Wright (1936) descobriu que, por cada vez que se duplicava o número de aeronaves produzidas, o tempo necessário para a sua construção diminuía 20%.

Assim, tomando como exemplo novamente a curva de aprendizagem da Figura 1, se a segunda execução da atividade demorar 8500 horas, então quando a mesma for executada pela quarta vez consecutiva deverá demorar apenas 85% do tempo que foi necessário para a desempenhar pela segunda vez, ou seja, $8500 * 0,85 = 7225$ horas. De forma mais simples, poderá dizer-se que, neste caso, cada vez que o número de execuções duplica, assiste-se a um aumento de produtividade de 15%, em resultado do efeito de aprendizagem. Deste modo, e como mencionado em Teplitz & Amor (1998), ao contrário do que a interpretação lógica possa induzir, quanto maior for a taxa de aprendizagem, menor será a redução na duração da atividade a que se irá assistir, à medida que o número de execuções vai aumentando. De notar que, no limite, dizer que uma atividade tem uma taxa de aprendizagem de 100% é o mesmo que dizer que a mesma não irá usufruir de quaisquer incrementos na produtividade, pelo facto de ser executada diversas vezes. Em resultado do que foi enunciado, a duração da décima sexta execução pode ser determinada através de (1) ou, simplesmente, fazendo $8500 * 0,85^3 = 5220,06$ horas.

Finalmente, é ainda importante referir algumas limitações e perigos inerentes à utilização das curvas de aprendizagem. Neste sentido, os gestores devem estar conscientes das principais precauções e críticas associadas às mesmas, particularmente (Ammar & Samy, 2015):

- A taxa de aprendizagem pode divergir de organização para organização e por tipo de trabalho. Portanto, é preferível determinar a taxa de aprendizagem tendo em atenção estudos empíricos, ao invés de assumir uma dada taxa;
- As previsões feitas, tendo por base as curvas de aprendizagem, devem ser interpretadas como aproximações da realidade e tratadas de acordo com essa premissa;
- Se as estimativas forem efetuadas tendo como ponto de partida o custo/duração da primeira unidade produzida, então é crucial que haja um cuidado redobrado para assegurar que estes últimos valores são válidos.

Tendo em consideração tudo o que foi exposto nesta secção, é relevante nesta fase inicial destacar que o fenómeno da aprendizagem terá um papel determinante nesta dissertação. Acreditando que na execução de atividades com características repetitivas o efeito de aprendizagem pode exercer um impacto demasiado relevante (sob a forma de redução na duração das mesmas) para ser menosprezado, este fator será, portanto, contemplado no problema da secção 2 – Parte II, sobre o qual este estudo irá incidir. Complementarmente, uma importante responsabilidade do gestor de projetos (GP) é a de elaborar previsões adequadas para a duração dos mesmos, sobretudo porque desta última dependem inúmeros elementos, tais como estimativas de custos e lucros, determinação da quantidade de recursos humanos e materiais necessários e, em última análise, a decisão de aceitar ou rejeitar a execução dos projetos (Teplitz & Amor, 1998; Ammar & Samy, 2015). Neste contexto, torna-se crucial entrar em linha de conta com o efeito de aprendizagem, de modo a que as estimativas efetuadas a vários níveis (durações, custos, recursos, entre outros) sejam o máximo possível sustentadas por pressupostos realistas. Desta forma, estar-se-á a contribuir para melhorar a precisão e o rigor da informação que suporta a tomada de decisão.

Assim, a questão central desta dissertação prende-se com a incorporação do efeito de aprendizagem na gestão de projetos repetitivos. Para a concretizar, primeiramente serão apresentadas, nas secções seguintes, algumas noções oportunas acerca da gestão de projetos e, em particular, sobre multi-projetos.

2. Gestão de Projetos

Os projetos representam um fenómeno comum no nosso dia-a-dia (Heizer & Render, 2008). Quer estejamos a planear a construção de uma casa, uma viagem, uma festa de aniversário ou até mesmo o desenvolvimento de um *software*, todos estes eventos se podem enquadrar na tipologia de projeto. Na maior parte das organizações e na vida social, em geral, assiste-se ao desenvolvimento de inúmeros projetos e existe um crescente interesse pelos mesmos e um número cada vez maior de pessoas a trabalhar nestes (Gustavsson, 2015). Vejamos de seguida o que se entende pelo conceito de projeto e, particularmente, pela sua gestão.

¹A norma do Instituto de Gestão de Projetos (PMI, 2004) define um projeto como um “esforço temporário empreendido para criar um único produto, serviço ou resultado”. Por seu turno, a Associação para a Gestão de Projetos (APM, 2012) define-o, no seu padrão internacional PRINCE 2, como “um esforço único e transitório para que se possa atingir um resultado desejado”. Assim, ambas as definições realçam o facto de um projeto ser uma organização temporária destinada a atingir um determinado resultado ímpar, que não se confunde com as atividades normais da organização, sendo este consequência da implementação do projeto. No que se refere à gestão de projetos, o PMI (2004) considera-a como sendo “a aplicação de conhecimentos, habilidades, ferramentas e técnicas às atividades do projeto de modo a atender aos requisitos do mesmo. Tal é conseguido através da aplicação e integração dos processos de gestão de projetos, nomeadamente, de iniciação, planeamento, execução, monitorização e controlo, e encerramento.” Em conformidade com esta definição, também a APM (2012), no seu padrão internacional referido anteriormente, vê a gestão de projetos como sendo “o processo através do qual os projetos são definidos, planeados, monitorizados, controlados e entregues para que os benefícios acordados sejam realizados”.

Assim, um fator fundamental que distingue a gestão de projetos da gestão propriamente dita, é que a primeira pretende atingir o tal resultado ímpar e ocorre num período de tempo finito, isto é, tem um início e um fim definidos, ao contrário da gestão que é um processo contínuo (Naybour, 2014). Este último autor refere, ainda, outras noções pertinentes sobre gestão de projetos que serão mencionadas de seguida.

Os projetos podem surgir em quase todas as indústrias e tipos de negócio, por exemplo:

¹ Os conteúdos deste parágrafo podem ser vistos numa perspetiva mais ampla em Kostalova *et al.* (2015).

- Transportes e infraestruturas;
- Tecnologias de informação;
- Fabricação de produtos;
- Construção civil;
- Mudanças regulatórias em finanças e direito.

Existem processos padronizados de gestão de projetos utilizados para planear e controlar as tarefas, orçamentos e prazos a cumprir, para se comunicar entre as diversas pessoas envolvidas e lidar com os riscos. Estes processos estão, geralmente, em curso ao longo de todo o projeto. Por outro lado, existem várias fases de um projeto que irão ter um começo e um fim definidos dentro da duração global do mesmo. Por exemplo, a fase de recolha de informações que descrevam em detalhe o foco do projeto e respetivos prazos e restrições, é algo que, frequentemente, ocorre apenas no início do projeto. Assim, resumidamente, um projeto tem um conjunto de processos que se encontram sempre presentes ao longo da sua duração e um conjunto de fases que têm, por norma, um momento específico para se iniciarem e terminarem, dando, sucessivamente, origem a outras fases.

Importa, também, fazer uma breve referência aos aspetos fundamentais associados à gestão de projetos. Assim, são de notar os seguintes (APM, 2012):

- Definir a razão pela qual o projeto é necessário;
- Foco nos requisitos do projeto, especificando a qualidade pretendida, estimando recursos necessários e tendo em atenção os prazos a cumprir;
- Preparar uma análise de negócio de modo a justificar eventuais investimentos necessários;
- Procurar garantir um acordo corporativo e, respetivo financiamento do projeto;
- Desenvolver e implementar um plano de gestão para o projeto;
- Liderar e motivar a equipa responsável pela execução do projeto;
- Gerir os riscos, mudanças e questões associadas ao projeto;
- Monitorizar o progresso, fazendo continuamente a comparação do previsto com o real;
- Gerir o orçamento do projeto;
- Assegurar a manutenção da comunicação com os *stakeholders*, bem como a organização do projeto;
- Proporcionar consultadoria em gestão sempre que necessário.

De uma forma mais específica, Kerzner (2013) define um projeto como sendo um conjunto de atividades ou tarefas interligadas que:

- Visam atingir um determinado objetivo singular, respeitando certas especificações;
- Possuem um começo e um fim bem definidos;
- Têm limites de financiamento (se aplicável);
- Consumem recursos humanos e materiais (i.e., capital, pessoas, equipamento);
- São multifuncionais (i.e., atravessam várias linhas funcionais).

Neste sentido, o sucesso na gestão de projetos implica atingir-se o objetivo mencionado anteriormente (Kerzner, 2013):

- Dentro do horizonte temporal estabelecido;
- Respeitando as restrições orçamentais;
- Com um nível adequado de desempenho tecnológico;
- Satisfazendo o cliente ou utilizador;
- Com uma quantidade mínima, ou mutuamente acordada, de mudanças no âmbito de realização;
- Sem perturbar o fluxo de trabalho principal da organização;
- Sem provocar alterações na cultura organizacional.

Ainda de acordo com Kerzner (2013), os potenciais benefícios da gestão de projetos envolvem a:

- Identificação das responsabilidades funcionais de modo a garantir que todas as atividades são tidas em consideração, independentemente da rotatividade dos colaboradores;
- Minimização da necessidade de comunicar continuamente informação de controlo;
- Reconhecimento das restrições temporais inerentes à calendarização;
- Identificação de uma metodologia para realizar análises entre *trade-offs* (não se pode ter tudo);
- Monitorização dos progressos reais em relação ao que havia sido planeado;
- Identificação antecipada de problemas para que seja possível adotarem-se medidas corretivas;
- Melhor capacidade para se realizarem previsões relativamente a um planeamento futuro;

- Reconhecimento de quando os objetivos não conseguem ser alcançados ou irão ultrapassar limites estabelecidos.

Adicionalmente, Heizer e Render (2008) identificam três fases na gestão de projetos:

- **Planeamento:** Esta fase inclui o estabelecimento de objetivos, a definição do projeto e a organização da equipa de trabalho. Adicionalmente, os objetivos devem ser definidos com metas associadas, custos que não se pretendem ultrapassar e com um nível de desempenho que se ambiciona atingir. Após os objetivos terem sido definidos com rigor, torna-se importante decompor o projeto em subcomponentes mais pequenas que possam ser, assim, mais facilmente geridas, seguindo um processo de Estrutura Analítica de Projetos (EAP), que advém do inglês *Work Breakdown Structure* (WBS). Também, a identificação dos recursos humanos e materiais necessários à execução do projeto deve acontecer nesta primeira fase;
- **Calendarização:** Esta fase atribui pessoas, dinheiro e materiais a atividades específicas e relaciona as atividades entre si. Deste modo, nesta etapa deve definir-se a sequência pela qual as atividades irão ser realizadas e atribuir uma duração a todas as atividades do projeto. Tendo em consideração estas duas últimas informações, deve ser possível estimar os recursos humanos e materiais necessários a cada etapa do projeto;
- **Controlo:** Nesta fase devem ser monitorizados os recursos, os custos, a qualidade e os orçamentos. Além disso, é possível rever ou modificar os planos anteriormente feitos e alterar recursos para garantir que determinados objetivos, relacionados com durações e custos, não são comprometidos. Em todos os aspetos que importa monitorizar, a comparação entre o que havia sido previsto com o real é essencial para um controlo eficaz.

A título de curiosidade, em Kerzner (2013) pode ser encontrada uma classificação envolvendo cinco fases distintas.

Para permitir aos gestores de projetos realizarem com sucesso as fases apresentadas anteriormente, existem três técnicas/ferramentas tradicionais e amplamente conhecidas, são elas os gráficos de *Gantt*, para as atividades e para os recursos, o método PERT (*Program Evaluation and Review Technique*) e o método do caminho crítico (*Critical Path Method – CPM*). Por serem tão populares, estas ferramentas encontram-se incorporadas na maior parte dos *softwares* que permitem agilizar o processo de gestão de projetos.

2.1 Trade-off estratégico

Tendo em consideração os conceitos da secção anterior, particularmente no que determina o sucesso na gestão de projetos, na teoria genérica da mesma existem três dimensões principais e, frequentemente, conflitantes entre si, nomeadamente: tempo, custo e qualidade.

O *trade-off* entre as várias dimensões anteriormente consideradas é ilustrado pelo conceito de Triângulo de Ferro, representado na Figura 2 e adaptado de Kerzner (2013).

Neste seguimento, o conceito referido acima pode ser definido da seguinte forma (Kerzner, 2013):

Definição 3 (Triângulo de Ferro) *Na gestão de projetos, o triângulo da Figura 2 representa o conjunto de trade-offs que estão presentes e interagem entre si na execução de um projeto, especificamente o tempo, o custo e o desempenho. Este último pode ainda ser interpretado com um sentido de âmbito de realização, qualidade ou nível tecnológico.*

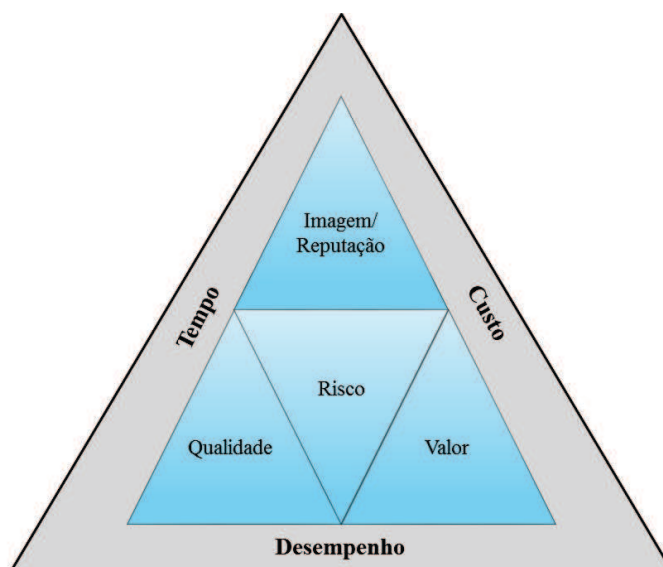


Figura 2 – Triângulo de Ferro da gestão de projetos

Posto isto, o objetivo da figura acima é demonstrar que a gestão de projetos tem como finalidade, entre outras, gerir ou controlar a utilização dos recursos de uma empresa numa determinada atividade e garantir que os projetos são efetuados dentro dos limites de tempo, custo e desempenho estabelecidos previamente (Kerzner, 2013).

Adicionalmente, a Figura 2 deve ser interpretada como um triângulo contemplando três dimensões, onde o espaço representa o conjunto de possibilidades diferentes para a execução de um mesmo projeto, evidenciando a necessidade de se prescindir, de um modo geral, de parte ou de alguma das dimensões. Deste modo, os gestores de projetos têm, sempre que necessário, de ter capacidade para abdicar de algo em favorecimento de um outro fator prioritário, para que o fluxo do trabalho principal da empresa não seja condicionado (Kerzner, 2013). Também, as três dimensões referidas anteriormente são utilizadas, frequentemente, como critério para medir o nível de sucesso de cada projeto (Kerzner, 2013).

Ainda de acordo com este último autor, o triângulo tempo, custo e desempenho representa a “combinação mágica” que é continuamente procurada pelos GP, à medida que o mesmo vai sendo executado.

Resumidamente, este conceito aponta para o facto de ser impossível “otimizar“, simultaneamente, as três dimensões da gestão de projetos. Neste sentido, o que é possível é privilegiar-se uma e/ou outra dimensão em detrimento da(s) restante(s), alcançando um compromisso razoável entre todas. A maior ou menor importância atribuída a cada dimensão dependerá, sobretudo, das circunstâncias e da estratégia de negócio que a empresa prossiga.

De notar que em Kerzner (2013) podem ser conhecidos alguns exemplos práticos e intuitivos de *trade-offs* que inevitavelmente surgem.

2.2 Gestão de multi-projetos

Atualmente, o contexto em que as empresas operam é cada vez mais complexo e dinâmico, o que leva a que muitas vezes exista a necessidade de executar vários projetos simultaneamente e, conseqüentemente, tal lança desafios adicionais e evidentes comparativamente à gestão isolada de apenas um projeto. Assim, torna-se cada vez mais comum assistir a situações em que as pessoas estão envolvidas em mais do que um projeto simultaneamente, o que se traduz numa complexidade acrescida à situação de trabalho, envolvendo esforços adicionais de gestão no sentido de melhor planejar, priorizar e monitorizar a utilização dos recursos (Engwall & Jerbrant, 2003 e Elonen & Artto, 2003). Nesta perspetiva, quando uma empresa efetua diversos projetos simultaneamente, muitas vezes interligados, com diferentes tamanhos, durações, orçamentos e complexidades, e compartilhando os mesmos recursos, isso implica conseguir responder com sucesso aos desafios de equilibrar múltiplas necessidades de alocação de recursos, ajustes rápidos para alterar pré-requisitos e uma forte capacidade de priorização, à medida que a organização vai abarcando diferentes grupos de projetos (Zika-Viktorsson *et al.*, 2003; Zika-Viktorsson *et al.*, 2006).

Neste cenário, para fazer face a um ambiente cada vez mais competitivo e em constante mudança, as organizações baseadas em projetos, que advêm do inglês *project based organizations* (PBOs), têm ganho protagonismo dado que são conhecidas por serem estruturas dotadas, sobretudo, das mais-valias de grande flexibilidade e capacidade para efetuar mudanças rápidas (Gustavsson, 2015). Mais concretamente, as PBO's podem ser definidas como organizações em que quase todas as suas atividades e operações se encontram organizadas e são desenvolvidas sob a forma de projetos e onde as estruturas mais permanentes que existem têm a função de fornecer apoio administrativo (Hobday, 2000; Söderlund & Tell, 2009; Zika-Viktorsson *et al.*, 2006). Com efeito, na maioria das PBO's, vários projetos são realizados em paralelo, o que consiste numa tentativa de utilizar recursos escassos de uma forma mais eficiente. Por exemplo, determinados conhecimentos, capacidades e equipamentos podem ser utilizados, desenvolvidos e compartilhados pelos diferentes projetos em curso (Engwall & Jerbrant, 2003). Assim, torna-se simples de perceber que, muitas vezes, só pelo facto de existir esta partilha de recursos limitados, os diversos projetos encontram-se inter-relacionados entre si. Esta ligação e o fenómeno de poderem existir interdependências de outra natureza entre os projetos tornam o progresso do

trabalho difícil de prever e de planejar, sendo também possível que os gestores e membros dos projetos percam o controlo sobre os seus próprios trabalhos, devido à existência de necessidades conflitantes entre os vários projetos e à dificuldade em obter uma visão global e integrada do conjunto dos projetos em que se encontram envolvidos (Engwall & Jerbrant, 2003; Zika-Viktorsson *et al.*, 2006). É ainda de realçar que em Gustavsson (2015) é possível verificar de uma forma mais abrangente os aspetos negativos e problemas associados a esta estrutura organizacional.

Na literatura, o conceito de gestão de multi-projetos é muitas vezes confundido com a gestão de um programa de projetos e também com a gestão de um portefólio de projetos, sendo ainda de evidenciar, que, inclusivamente, estes termos podem surgir como designações intimamente relacionadas em vários conteúdos acerca da gestão de vários projetos (Elonen & Artto, 2003; Ponsteen & Kusters, 2015). Começando pelo conceito de gestão de um portefólio de projetos, Archer & Ghasemzadeh (1999) e Dye & Pennypacker (1999) definem-no como sendo um grupo de projetos que competem por recursos escassos (tempo, mão-de-obra, financeiros, entre outros) e que são conduzidos sob a gestão de uma determinada organização. A definição anterior é semelhante a muitas definições, presentes na literatura, de gestão de um programa de projetos. Por exemplo, e conforme referido em Elonen & Artto (2003), Turner (1999) realça que num programa de projetos, estes formam um grupo coerente que é gerido de uma forma coordenada, de modo a proporcionar um benefício adicional. Também, de acordo com este último autor, a gestão de um programa de projetos inclui, entre outros, a gestão das relações entre projetos e a decisão de priorização dos recursos na sua alocação aos diversos projetos que se pretendem realizar. Ainda neste contexto, Murray-Webster & Thiry (2000) definem um programa como sendo um conjunto de ações de mudança (projetos e atividades operacionais) que no seu todo criam um grupo propositadamente orientado para que possam atingir benefícios estratégicos e/ou táticos.

Tendo em consideração as definições anteriores e ambas as áreas da gestão mencionadas (portefólio e programa de projetos), bem como os seus respetivos contributos para a gestão estratégica em contexto de multi-projetos, Elonen & Artto (2003) consideram que a gestão de um portefólio de projetos inclui a gestão das relações entre os diversos projetos, a necessidade de garantir que no seu todo os projetos formam um grupo coerente que deve ser gerido de uma forma coordenada e de acordo com os recursos disponíveis e seus limites de alocação, bem como outras restrições. Adicionalmente, este último artigo

refere ainda que, segundo Cooper *et al.* (1998), os três objetivos bem conhecidos da gestão de um portfólio de projetos são os seguintes:

- Maximizar o valor do conjunto dos projetos;
- Estabelecer a ligação entre o portfólio de projetos e a estratégia da organização;
- Equilibrar o portfólio de projetos, por exemplo, nas dimensões de curto-prazo *versus* longo-prazo e baixo risco *versus* elevado risco.

Assim, o conceito de gestão de um portfólio de projetos tem evoluído ao longo do tempo e, mais recentemente, é visto numa perspetiva mais abrangente, significando a gestão de múltiplos projetos (Miguel, 2008). Neste sentido, o contexto de multi-projetos pode ser definido como um conjunto de projetos, que não se encontram necessariamente relacionados de uma forma funcional, mas que partilham uma mesma fonte organizacional de recursos comuns, devendo ser geridos de um modo estruturado e entregues tendo em conta os objetivos da organização (Ponsteen & Kusters, 2015). Este último artigo, tendo como referência Dye & Pennypacker (2000), define concretamente o que se deve entender por gestão de multi-projetos, a saber:

Definição 4 (Gestão de multi-projetos) *Gestão tática de curto-prazo de um conjunto de projetos em execução que partilham os mesmos recursos.*

Deste modo, sucintamente, a gestão de multi-projetos pode, portanto, ser interpretada como uma parte integrante da gestão de um portfólio de projetos.

Tendo presente esta definição de gestão de multi-projetos, importa agora debruçarmo-nos sobre os diferentes tipos de abordagens utilizadas na sua gestão, com particular enfoque no problema da alocação de recursos escassos aos vários projetos em execução, que, pelos motivos enunciados no começo desta secção, é considerado o desafio primordial da gestão de multi-projetos (Engwall & Jerbrant, 2003).

Resolver o problema da alocação de recursos é fundamental para garantir e promover o desempenho da organização (Ponsteen & Kusters, 2015). Assim, como não é objetivo desta dissertação aprofundar esta questão, serão apenas referidas, de modo superficial, as abordagens mais comuns utilizadas, à luz duma revisão de literatura mais completa e detalhada feita em Ponsteen & Kusters (2015).

Com efeito, uma abordagem frequente é a utilização de heurísticas (Ponsteen & Kusters, 2015). O número de publicações sobre este tema, nos jornais científicos mais

populares de gestão de projetos, tem diminuído nos últimos anos, mas apesar disso continua a representar um valor significativo (Kwak & Anbari, 2009).

Uma outra característica importante do contexto de multi-projetos é a incerteza (Ponsteen & Kusters, 2015). Assim, as abordagens de gestão baseadas em *buffers* são uma classe de métodos na gestão de multi-projetos que incorporam a incerteza na duração das atividades, sendo que um dos mais utilizados é o *método da corrente crítica* (CCPM) (Goldratt, 1997). É de notar que o CCPM difere do CPM, pois considera os efeitos da alocação e do nivelamento dos recursos, bem como da incerteza na duração das atividades que definem o caminho crítico do projeto (Paiva, 2012). Por seu turno, as *políticas de partilha de recursos* formam uma classe diferente, destinada a fazer face aos conflitos inevitáveis que surgem numa organização matricial, nomeadamente entre projetos, recursos e na gestão de um portefólio (Laslo & Goldberg, 2008).

Contrariamente às classes mencionadas nos parágrafos anteriores, a abordagem *multi-agente* organiza a alocação de recursos de uma forma descentralizada (Ponsteen & Kusters, 2015).

Relativamente à área de desenvolvimento de *software*, o *agile scrum* é um método conhecido para a gestão de multi-projetos no qual, por oposição ao método de desenvolvimento em *cascata*, o âmbito de realização é definido de um modo flexível (Ponsteen & Kusters, 2015). No método de desenvolvimento *agile scrum* existem equipas multidisciplinares, com um elevado nível de auto-organização, que executam o trabalho em *sprints*, isto é, realizam tarefas específicas num determinado período de tempo finito (Sutherland, 2005; Ponsteen & Kusters, 2015). Com efeito, de acordo com Sutherland (2005), a abordagem de gestão de multi-projetos do *agile scrum* é designada por *scrum-of-scrums*.

Em oposição ao método anterior, na abordagem de *gestão de sistemas* o contexto de gestão de multi-projetos pode ser considerado como um sistema controlado por *feedback loops*, ou seja, em que a informação circula por todos os projetos em execução, é modificada por estes e, de seguida, regressa ao ponto onde essa informação foi originada, para influenciar comportamentos, quer de um modo positivo (incentivar) ou negativo (reprimir) (Aritua *et al.*, 2009).

Tendo em consideração todas as abordagens referidas anteriormente, as mesmas sintetizam-se na Tabela 2, que foi adaptada de Ponsteen & Kusters (2015). É ainda de

salientar que o resumo feito nesta tabela tem por base a classificação feita por Dong *et al.* (2008).

Abordagens na gestão de multi-projetos	Características	Referências
1. Métodos heurísticos	Algoritmos de otimização	Browning & Yassine (2010)
2. Abordagens de gestão baseadas em <i>buffers</i> , como por exemplo, o método da corrente crítica	Incorporação da incerteza	Herroelen & Leus (2004); Cohen <i>et al.</i> (2004)
3. <i>Agile - Scrum-of-Scrums</i>	Gestão flexível do âmbito de realização	Sutherland (2005); Greening (2010)
4. Métodos baseados na perspectiva Multi-agente	Tomada de decisão descentralizada	Jennings & Wooldridge (1995); Adhau <i>et al.</i> (2012)
5. Políticas de partilha de recursos, com equipas núcleo e dedicadas, assim como fontes comuns de partilha de recursos	Lidar com os conflitos entre projetos, recursos e na gestão de um portefólio	Besikci <i>et al.</i> (2011); Hendriks <i>et al.</i> (1999); Laslo & Goldberg (2008)
6. Gestão de sistemas	Controlo efetuado por <i>feedback loops</i>	Aritua <i>et al.</i> (2009)

Tabela 2 - Abordagens na gestão de multi-projetos.

Adicionalmente, em Ponsteen & Kusters (2015), as abordagens da Tabela 2 são classificadas em duas dimensões. Uma dimensão classifica se a tomada de decisão é centralizada ou descentralizada. A outra dimensão classifica como é abordado o problema, isto é, se depende da perceção humana ou se é baseado em algoritmos de otimização. Neste sentido, a utilização de modelos que simplificam a realidade permite tomar decisões automatizadas, sendo que estes modelos assentam em procedimentos heurísticos e contribuem para melhorar o processo de tomada de decisão, pois incorporam um número maior de variáveis (Ponsteen & Kusters, 2015). Pelo contrário, a abordagem em que a tomada de decisão é sustentada pela perceção humana tem o seu fundamento na ideia de que um algoritmo nunca consegue incorporar todas as situações que podem ocorrer na vida real, ao mesmo tempo que defende que os seres humanos são muito mais flexíveis para se ajustarem a situações que não foram previstas (Ponsteen & Kusters, 2015). Assim, esta classificação a duas dimensões dá origem à matriz da Tabela 3, adaptada de Ponsteen & Kusters (2015).

Decisão descentralizada	<i>Scrum of Scrums</i>	Multi-agente
Decisão centralizada	Políticas de partilha de recursos	Método da corrente crítica Métodos heurísticos Gestão de sistemas
	Perceção humana	Decisão automatizada

Tabela 3 – Classificação das abordagens de gestão de multi-projetos

Finalmente, estes autores utilizam ainda esta matriz para classificar as abordagens referidas tendo em conta o triângulo de ferro da gestão de projetos. Este último aspeto, bem como uma análise mais detalhada destes conteúdos, pode ser vista em Ponsteen & Kusters (2015).

2.3 Gestão de multi-projetos repetitivos com incorporação do efeito de aprendizagem

Como referido anteriormente, os projetos de natureza repetitiva assumem-se como candidatos privilegiados para a incorporação do efeito de aprendizagem na sua gestão. Neste sentido e no âmbito desta dissertação, por projetos repetitivos poderá entender-se o seguinte:

Definição 5 (Projetos repetitivos) *Conjunto de atividades que são realizadas com o propósito de se concretizar algum objetivo ou produzir algum output, sendo que, e por alguma razão, torna-se necessário executar esse mesmo conjunto de atividades diversas vezes, por exemplo, para produzir múltiplas unidades do output mencionado atrás.*

Assim, são vários os exemplos práticos em que, na sua atuação, as empresas se deparam com projetos repetitivos, tais como a necessidade de satisfazer uma encomenda de diversos componentes iguais ou, até mesmo, a implementação de um novo sistema de gestão nas diferentes sucursais. Outro exemplo, não tão óbvio, e estudado empiricamente em Couto & Teixeira (2005), envolve a construção de um prédio em que os vários andares possuem um elevado nível de semelhança podendo ser, portanto, considerados como projetos repetitivos. Adicionalmente, a construção de autoestradas, pontes, túneis, caminhos-de-ferro, redes de esgoto e de transporte em *pipeline*, podem também ser considerados como projetos repetitivos (Couto & Couto, 2010).

Dado que em muitos casos de projetos repetitivos é verossímil que os mesmos possam ser executados simultaneamente, o problema da sua gestão apresenta-se como sendo um caso particular do contexto da gestão de multi-projetos, apresentado na secção anterior. Isto porque a única diferença reside apenas no facto de os vários projetos a efetuar serem idênticos ou similares. Assim, por possuírem esta característica peculiar e tendo em atenção o que foi exposto na secção 1, pode ser sensato, caso as atividades dos projetos sejam realizadas por uma mesma equipa de colaboradores, considerar um incremento na produtividade pelo facto de se executarem projetos repetitivos sucessivamente. Também, tendo em conta essa secção, torna-se evidente que a não consideração do efeito de aprendizagem, na gestão de projetos repetitivos (GPR), poderá traduzir-se em inúmeras ineficiências, sendo as mais óbvias a excessiva alocação de recursos às atividades e a sobrestimação da data de conclusão dos vários projetos. Este último fenómeno sucede pelo facto de não se ter em atenção a redução esperada na duração de atividades repetitivas e,

como parte das necessidades de equipamentos, recursos humanos e materiais estão dependentes do fator tempo, tal reflete-se diretamente numa afetação exagerada de recursos, com um impacto claro nos custos e provocando uma má gestão dos fatores de produção.

Neste sentido, entrar em linha de conta com o efeito de aprendizagem, na GPR, pode permitir utilizar os recursos de um modo mais eficiente e, principalmente, realizar previsões mais realistas quanto à duração e custo dos mesmos, o que resulta numa maior precisão nos processos de orçamentação e calendarização, beneficiando, por sua vez, a capacidade das empresas em oferecer aos seus parceiros de negócio propostas/ofertas mais competitivas (Ammar & Samy, 2015; Badukale & Sabihuddin, 2014). Este último aspeto torna-se essencial seja qual for a estratégia de negócio que a empresa prossiga.

Assim, apesar de se perceber claramente o interesse desta questão, a GPR é uma temática que na literatura não se encontra tão explorada, como por exemplo, o caso genérico da gestão de multi-projetos. Inclusivamente, é de salientar que o número de publicações sobre GPR, com a incorporação do efeito de aprendizagem, nos principais jornais científicos de gestão de operações e projetos, é relativamente escasso. Importa também referir que as ferramentas tradicionais de gestão de projetos, como referido anteriormente, CPM, PERT e gráficos de *Gantt*, não têm em consideração a natureza repetitiva que existe em produzir múltiplas unidades. Ao invés disso, estes métodos assumem que cada projeto envolve apenas a produção de uma única unidade e, por isso, o efeito de aprendizagem não é tido em conta (Shtub *et al.*, 1996).

Por seu turno, importa agora apresentar alguns desenvolvimentos presentes na literatura e relevantes para o contexto em que se insere esta secção, pois incidem sobre situações semelhantes às que irão ser alvo de foco nesta dissertação. Começando por Teplitz & Amor (1998), estes autores pretenderam incorporar o efeito de aprendizagem em programas que envolvem a realização de vários projetos repetitivos. Deste modo, o seu principal objetivo era procurar simplificar o processo de combinar as curvas de aprendizagem com o CPM, de modo a que estas duas técnicas pudessem ser conjuntamente utilizadas para melhorar a precisão das estimativas, relativamente à duração total do programa mencionado. Neste sentido, os autores propuseram dois métodos simples que, independentemente do número de repetições e atividades do programa, realizam aproximações para a duração do mesmo, utilizando apenas as durações do primeiro e último caminhos críticos de todo o programa de projetos repetitivos. Procedendo deste modo, muito do trabalho computacional é agilizado, tornando o processo muito menos moroso, sendo que

a única contrapartida é apenas uma pequena perda de qualidade nas previsões efetuadas (nos vários exemplos apresentados a perda de capacidade explicativa oscilou entre 1,4% e 3,3%). Adicionalmente, considerar o efeito de aprendizagem na GPR pode fazer com que o caminho crítico se altere ao longo da execução dos vários projetos, isto porque a redução que se assiste na duração de atividades críticas pode exceder a redução que ocorre em atividades não críticas (Teplitz & Amor, 1998). Assim, como ambos os métodos propostos por estes últimos autores incidem apenas sobre a primeira e última repetições do programa, não existe a necessidade de averiguar as eventuais alterações que poderão ocorrer no caminho crítico. Tendo em conta o que foi exposto, as abordagens deste artigo demonstram ser válidas para desenvolver uma estimação apropriada da duração de um programa, envolvendo a realização de múltiplos projetos repetitivos em sequência, tendo presente o efeito da aprendizagem. Contudo, estes benefícios são conseguidos à custa de um pressuposto muito redutor que assenta no facto de cada repetição só poder ter início após a repetição anterior ter sido finalizada. Assim, os autores “forçam” a aprendizagem e não possibilitam que várias atividades de diferentes projetos possam ser executadas simultaneamente, por diferentes equipas de trabalho. Resumidamente, não estamos, portanto, num contexto em que os vários projetos repetitivos possam ser efetuados de forma paralela, o que não permite que o gestor de projetos (GP) possa decidir em que circunstâncias é desejável, ou não, aproveitar os benefícios que resultam da aprendizagem.

Por oposição a esta situação, Ash & Smith-Daniels (1999) desenvolveram uma heurística para o problema da gestão de múltiplos projetos, entrando em linha de conta com a possibilidade de diversas equipas se dedicarem a projetos em paralelo, introduzindo, também, os efeitos da aprendizagem, do esquecimento e da reaprendizagem. Apesar destas melhorias, este último artigo considera que a aprendizagem surge por se desempenharem atividades sequencialmente ao longo de um projeto que apenas ocorre uma única vez e, por isso, aborda a questão da aprendizagem numa perspetiva diferente daquela que advém da natureza repetitiva dos projetos, tal como se pretende nesta dissertação.

Como referido anteriormente, Couto & Teixeira (2005) analisaram empiricamente a pertinência da incorporação do efeito de aprendizagem num contexto de GPR e na área da construção civil em Portugal, no sentido de perceber se tal poderia contribuir para uma maior precisão nas previsões efetuadas, ao nível da duração dos vários projetos. No seu estudo, foi possível identificar que, no caso mais favorável, os ganhos de produtividade atingiram os 33%. Também, pela aplicação a dois casos de estudo de uma curva de aprendizagem que

evolui a dois estados (nas primeiras repetições a um declive negativo constante, até se atingir um limite em que não são esperados mais ganhos de produtividade), observou-se que a mesma acompanhou de forma adequada os progressos reais verificados. Este último artigo apresenta ainda evidência de vários fatores que podem afetar o processo de aprendizagem e que devem ser tidos em atenção, de modo a que se possa beneficiar ao máximo do mesmo, nomeadamente:

- **Características dos projetos:** Alguns projetos permitem que se verifique uma maior aprendizagem do que em outros;
- **Acontecimentos inesperados:** No decorrer dos projetos, estas ocorrências podem implicar mudanças ao que havia sido planeado e introduzir atrasos;
- **Mudanças nas equipas de trabalhadores:** A entrada de novos membros nas equipas, que necessitam de tempo para se adaptarem, pode provocar um retrocesso na curva de aprendizagem e, conseqüentemente, provocar atrasos;
- **Substituição de equipas de trabalhadores ou de entidades subcontratadas:** Estas situações devolvem os níveis de produtividade para o seu início;
- **Fraca gestão:** A falta de planificação e/ou preparação do trabalho e a existência de insuficientes fatores produtivos implicam, frequentemente, atrasos e promovem a frustração e desmotivação dos recursos humanos, o que em última análise se reflete em baixos níveis de produtividade.

Complementarmente ao artigo anterior, Ammar & Samy (2015) estudaram, também empiricamente, tendo por base a atividade de soldadura em oito projetos repetitivos, a incorporação do efeito de aprendizagem na construção de gasodutos no Egipto, focando-se, em particular, no problema de determinar qual o modelo de curva de aprendizagem que melhor se ajusta aos dados que se pretendem prever. Procedendo desta forma, o objetivo destes autores foi o de contribuir para que se realizassem previsões de progressos futuros, em contexto de GPR, de uma forma mais precisa. Apesar de neste último artigo, e também em Couto & Teixeira (2005), não se contemplar a questão de vários projetos repetitivos poderem ser executados simultaneamente, estas referências são exemplos pertinentes pois demonstram que, num cenário de GPR, o efeito de aprendizagem pode conduzir a ganhos de produtividade demasiado relevantes para ser descurado. Adicionalmente, ambos os artigos apontam para o desafio acrescido que eventuais interrupções na execução dos projetos provocam, promovendo o esquecimento e conseqüente redução na produtividade dos colaboradores, dificultando, assim, a aplicação do conceito de curva de aprendizagem. Neste

seguimento, também Couto & Couto (2010) mencionam a necessidade de os métodos de GPR procurarem maximizar a continuidade do trabalho das equipas de construção, permitindo que estas terminem as suas tarefas numa determinada localização do projeto e se movam prontamente para o local seguinte, de modo a minimizar as interrupções. Desta forma, a produtividade das equipas aumenta, não só por se diminuírem os tempos mortos, mas também porque isso conduz a um melhor aproveitamento dos benefícios que podem advir do efeito de aprendizagem (Ashley, 1980; El-Rayes, 2001).

Assim, importa agora referir os métodos mais relevantes, presentes na literatura, para a GPR. Apesar de vocacionado para a área da construção civil, Couto & Couto (2010) apresentam uma análise sucinta acerca desta temática e, como tal, irei seguir nos parágrafos abaixo os aspetos mais importantes presentes na mesma. Neste sentido, os autores começam por afirmar que a maior parte dos métodos desenvolvidos de GPR tem por base a ideia de que um projeto repetitivo envolve a realização de várias unidades idênticas. Consequentemente, é utilizada uma rede para representar as atividades, bem como a sua sequência lógica, que necessitam de ser desenvolvidas para que se possa produzir uma única unidade. Neste seguimento, a rede anterior é, então, replicada para cada unidade idêntica adicional que se pretenda realizar, como demonstra o exemplo da figura seguinte, implicando a produção de três unidades idênticas.

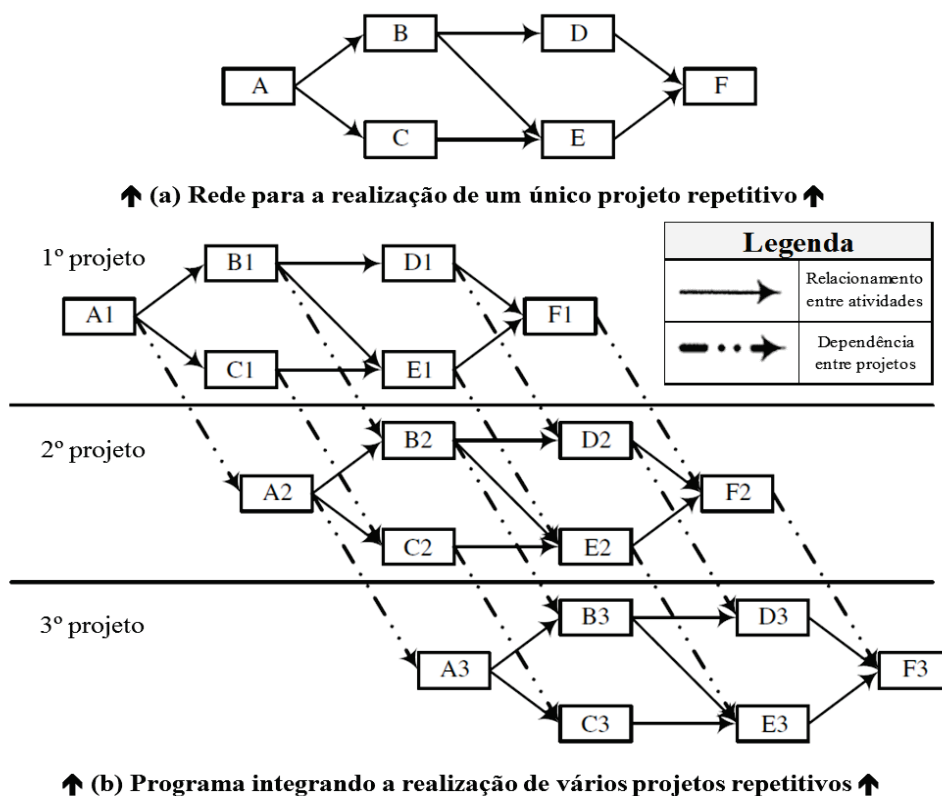


Figura 3 - Exemplo de vários projetos repetitivos e do inter-relacionamento entre as suas atividades. Adaptado de Huang & Sun (2009) e Harris & Ioannou (1998).

Neste contexto, por norma, cada atividade é atribuída a uma equipa de trabalho e, do ponto de vista da aprendizagem, é desejável que cada equipa desempenhe sucessivamente a mesma atividade nos diversos projetos repetitivos, promovendo, desta forma, ganhos na produtividade. Adicionalmente, também em Couto & Couto (2010) podem ser observadas, em detalhe, algumas críticas associadas à incorporação do CPM no cenário da figura anterior. Em resumo, estas incluem:

1. A necessidade fastidiosa de representar todas as atividades ao longo dos diversos projetos repetitivos;
2. Não é contemplado o carácter repetitivo dos projetos;
3. Não é assegurada a continuidade do trabalho para as equipas, sendo este um aspeto chave em projetos repetitivos.

Assim, métodos específicos que abordam a questão dos projetos repetitivos têm sido desenvolvidos na literatura nas últimas décadas, sobretudo, devido às críticas anteriores inerentes à utilização do CPM em GPR. Estes métodos são baseados no conceito de *linha de balanço* (LOB), do inglês *line of balance*, que levou à criação de uma técnica de programação com o mesmo nome e, posteriormente, serviu de tronco para a ramificação em métodos subsequentes.

O método da LOB foi desenvolvido pela marinha norte-americana durante a Segunda Guerra Mundial para a programação de projetos, quer repetitivos ou não, embora a sua utilização num cenário de GPR seja mais interessante. Este método baseia-se na atribuição de níveis de produção constantes às atividades e pode ser representado através de um diagrama num sistema de eixos ortogonais, onde o eixo vertical mede o número acumulado de unidades produzidas e o eixo horizontal expressa uma escala de tempo. Neste diagrama, cada segmento de reta representa uma atividade e o seu declive indica o nível de produção. De referir que, nos métodos inicialmente propostos, assumem-se níveis de produção constantes ao longo de todo o projeto. Porém, noutros métodos mais recentes, esta clara limitação já se encontra ultrapassada. As principais vantagens e desvantagens desta técnica encontram-se explicitadas, em detalhe, em Couto & Couto (2010), Ammar (2013) e Badukale & Sabihuddin (2014). A título de exemplo, um método tendo por base a LOB é apresentado na Figura 4 (adaptado de Couto & Teixeira, 2002).

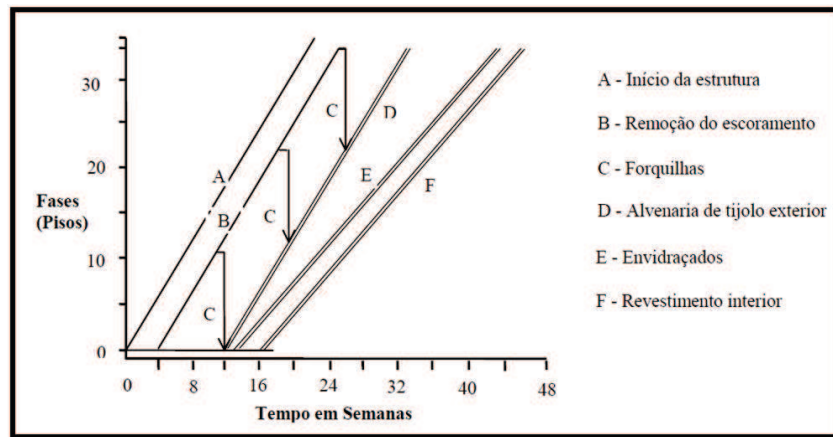


Figura 4 - Plano de trabalhos para projetos de construção em altura segundo o método de produção vertical (VPM).

Naturalmente, foram sendo incorporados desenvolvimentos adicionais à técnica anteriormente mencionada, podendo-se destacar os incrementos preconizados por Lumsden (1968), Khisty (1970), Carr & Mayer (1974), O'Brien (1975), Stradal & Cacha (1982), O'Brien *et al.* (1985), Arditi & Albulak (1986), Al Sarraj (1990), Reda (1990), Harris & Ioannou (1998), entre outros. Assim, tendo por base o conceito de LOB, foram propostos diferentes métodos para projetos de construção com características repetitivas, sendo que alguns destes podem ser vistos na Figura 5.



Figura 5 - Evolução dos métodos de programação a partir do conceito de linha de balanço. Adaptado de Couto & Couto (2010).

Uma análise a alguns dos métodos referidos na figura anterior pode ser consultada em Couto & Couto (2010), onde também se encontra mencionada uma abordagem de Suhail & Neale (1994) que combina os métodos CPM e LOB num único método designado por CPM-LOB, que procura, de uma forma integrada, beneficiar conjuntamente das vantagens que, isoladamente, ambas as técnicas proporcionam. Contudo, à semelhança do que acontece nas ferramentas tradicionais de gestão de projetos, a maioria dos métodos referidos para a GPR não entra em linha de conta com o efeito de aprendizagem. Inclusivamente, o método tradicional da LOB, apesar de possuir a vantagem de assegurar a continuidade do trabalho das equipas ao longo dos vários projetos repetitivos, não contempla o efeito de aprendizagem (Ammar & Abdel-Maged, 2013).

Com efeito, Arditi *et al.* (2001) demonstraram, pela primeira vez, o potencial de incorporar o efeito de aprendizagem no método da LOB e, mais recentemente, também Ammar & Abdel-Maged (2013) desenvolveram um modelo, para a programação de projetos repetitivos, em que a curva de aprendizagem log-linear foi aplicada ao método da LOB, com as devidas alterações para permitir a utilização de várias equipas de trabalho. Neste contexto, cientes do papel significativo que o efeito de aprendizagem pode ter no progresso de trabalhos repetitivos na construção em altura, Couto & Teixeira (2002) elaboraram uma técnica designada por *método das curvas de equilíbrio* (MCE), que conjuga o método VPM com o modelo log-linear de curva de aprendizagem. No seu estudo demonstraram que é possível criar metodologias de planeamento onde estejam presentes os atributos das ferramentas tradicionais e, também, os que resultam da aplicação de métodos específicos que abordam o problema do trabalho repetitivo (Figura 5), ao mesmo tempo que se considera um aumento de produtividade resultante da aprendizagem, permitindo previsões mais próximas da realidade. Adicionalmente, também Ammar (2013), pelas mesmas razões de Suhail & Neale (1994), propôs um modelo de programação para projetos repetitivos integrando os métodos CPM e LOB, de uma forma simples, analítica e não gráfica. Neste último caso, apesar de ainda assim não ter sido introduzido o efeito de aprendizagem, o autor argumenta que o modelo desenvolvido pode ser adaptado com o propósito de o incluir.

Para finalizar esta secção, importa agora referir que o problema, presente na literatura, que mais se assemelha àquele que irá ser abordado nesta dissertação encontra-se presente no artigo de Shtub *et al.* (1996). Este problema envolve a calendarização de programas que integram a produção de múltiplas unidades de um mesmo produto, sendo necessário decidir quantas unidades de produto devem ser entregues, para produção, a cada uma das equipas

de trabalho disponíveis. Assim, cada unidade que necessita de ser produzida corresponde a um projeto, dentro do programa, e possui uma determinada data de entrega, uma penalização em caso de atraso e um eventual bônus se a unidade for completada antecipadamente. Como estamos perante projetos repetitivos e assumindo que o fabricante nunca produziu este tipo de produtos, são esperados substanciais efeitos de aprendizagem (tanto ao nível do custo como da duração) que resultam de uma mesma equipa produzir vários produtos idênticos sequencialmente. Deste modo, facilmente se percebe a pertinência do problema e a forma em como estes aspetos se podem tornar conflitantes entre si, dando origem a um possível *trade-off* estratégico que será explorado na secção 2.1 – Parte II. Adicionalmente, para se perceber melhor este problema, vejamos a figura abaixo (adaptada de Shtub *et al.*, 1996) que representa um exemplo de uma solução para um programa integrando a produção de oito unidades idênticas.

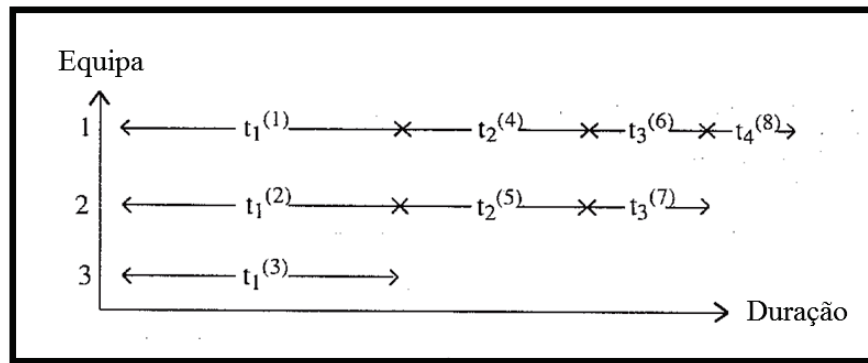


Figura 6 – Tempos de produção para as unidades 1-8 (o número das unidades é representado entre parêntesis).

Nesta solução, à equipa 1 são atribuídas quatro unidades (1,4,6,8), a equipa 2 produz três unidades (2,5,7) e a equipa 3 apenas uma (3). É, ainda, de notar que as unidades 1, 2 e 3 são produzidas simultaneamente pelas três equipas diferentes e, à medida que as equipas 1 e 2 produzem sucessivamente, constata-se benefícios resultantes da aprendizagem.

Para abordar este problema, Shtub *et al.* (1996) focaram-se na minimização dos custos diretos de produção, acrescidos de penalizações e diminuídos pelos eventuais bônus. Neste sentido, propuseram duas estruturas de custos, três modelos matemáticos diferentes e, ainda, métodos de resolução para o seu terceiro modelo.

Porém, neste último artigo, os autores simplificam o conceito de produzir uma unidade e afirmam que é necessária investigação adicional, no sentido de decompor cada unidade num projeto e, conseqüentemente, num conjunto de atividades específicas, em que cada uma destas últimas é executada por uma equipa especializada diferente.

Esta sugestão, que analisa os projetos repetitivos mais detalhadamente, será tida em consideração nesta dissertação. Por fim, para estudar o problema da GPR, com a incorporação do efeito de aprendizagem, será utilizado o modelo de programação matemática multiobjetivo, desenvolvido por Gomes da Silva & Carreira (2016), apresentado na secção 2 – Parte II.

Em relação a este último, é abordado um problema de multi-projetos, podendo estes ser executados em paralelo, em que os vários projetos a efetuar são exatamente iguais, no que se refere ao número de atividades e às suas relações de precedência.

O tempo necessário para desempenhar uma determinada atividade pode diminuir, caso a mesma seja executada, pelo menos, mais do que uma vez por uma mesma equipa, seguindo o comportamento previsto pela equação (1) do modelo log-linear de curva de aprendizagem, apresentado anteriormente na secção 1. Adicionalmente, a única variável que terá impacto sobre a duração das atividades é o efeito de aprendizagem.

Neste modelo, o gestor de projetos tem a capacidade de influenciar as dimensões tipicamente conflitantes tempo, custo e qualidade, necessitando, para tal, de determinar o número total de equipas que irá executar cada atividade dos vários projetos. Desta decisão dependerá, naturalmente, o maior ou menor aproveitamento dos benefícios inerentes à aprendizagem, conduzindo a um *trade-off* estratégico semelhante, mas mais complexo, ao que havia sido referido anteriormente em Shtub *et al.* (1996). Como ambos se complementam, também este *trade-off* será apresentado na secção 2.1 – Parte II e constituirá o principal foco da mesma. Por outro lado, numa lógica semelhante a Shtub *et al.* (1996), cada projeto repetitivo terá uma determinada data de entrega, uma penalização em caso de atraso e um eventual bónus por antecipação.

Deste modo, a primeira dimensão (tempo) é representada por uma função de minimização do atraso máximo na conclusão dos vários projetos repetitivos, para a segunda (custo) é tido em consideração a minimização dos custos totais (semelhante a Shtub *et al.*, 1996) e, por último, a dimensão da qualidade é representada pela minimização do número total de equipas usadas em todos os projetos. Enquanto os dois primeiros objetivos são relativamente intuitivos, a razão de ser deste último carece de uma explicação adicional que será apresentada na respetiva secção do modelo em 2 – Parte II.

PARTE II – Modelo de programação matemática multiobjectivo aplicado à GPR

Nesta parte ir-se-á apresentar o modelo de programação matemática multiobjectivo, os conceitos de solução eficiente e de não dominada, fronteira de Pareto, principais abordagens na resolução de problemas multiobjectivo, os conceitos de heurística e meta-heurística e uma referência às medidas de avaliação das soluções obtidas pelos métodos de resolução aproximada. Seguidamente, far-se-á a apresentação do modelo multiobjectivo que incorpora o efeito de aprendizagem na gestão de projetos repetitivos e que contempla explicitamente as dimensões qualidade, tempo e custo. Este é o modelo para o qual serão propostas, na parte III, quatro heurísticas dedicadas à geração da FP. De modo a melhor compreender o impacto do efeito de aprendizagem, serão ainda ilustradas duas situações referentes à ausência de aprendizagem e aprendizagem máxima.

1. Problemas de programação matemática multiobjetivo

Pelo facto de esta dissertação ter por base um modelo matemático com mais do que uma função objetivo, alguns aspetos essenciais sobre a temática da programação matemática multiobjetivo devem, portanto, ser destacados. Para tal, nesta secção seguir-se-á parte do trabalho efetuado por Gomes da Silva (2004), mais concretamente os seus capítulos 1 e 2.

Assim, relativamente aos modelos de natureza mono-objetivo, ou seja, que apenas possuem uma função objetivo, o que se pretende é descobrir, em geral, a chamada solução ótima. Esta poderá ser definida como a solução que reflete, no objetivo que se pretende otimizar, os melhores valores, de entre todas as possibilidades, para as variáveis de decisão e tendo em consideração todas as restrições presentes no problema. Acontece que muitas vezes, por imposição da complexidade da realidade e do processo de decisão, surge a necessidade de analisar os problemas numa perspetiva multidimensional, entrando em linha de conta com vários critérios. Como consequência, tal inviabiliza frequentemente a perspetiva mono-objetivo, sendo particularmente mais adequados os modelos multiobjetivo e respetivos métodos de resolução. De facto, conforme refere Cohon (1978), “talvez o principal argumento para a utilização de métodos multiobjetivo venha da realidade: os problemas reais são de natureza multiobjetivo”.

Os modelos multiobjetivo não possuem, em geral, uma solução que otimiza simultaneamente todas as funções objetivo do problema que se pretende resolver. Para o compreender, basta-nos pensar na compra de um automóvel, por exemplo, onde alguns critérios básicos que frequentemente afetam a tomada de decisão do agente são a potência do motor, o consumo do automóvel e o seu preço. Neste caso simples, o ideal para o agente decisor (AD) seria encontrar, entre todas as alternativas disponíveis, um automóvel que conjuntamente maximizasse o primeiro critério referido anteriormente e minimizasse os dois últimos. Neste sentido, se tal solução existir, é como se estivéssemos perante um problema mono-objetivo, isto porque, a solução ótima para qualquer objetivo corresponde também ao ótimo para os restantes objetivos. Contudo, o que torna os problemas multiobjetivo mais difíceis de resolver é a situação comum, em que a solução ótima para um determinado objetivo não é a mesma que otimiza os restantes objetivos e vice-versa. Como se torna evidente, e recuperando o exemplo anterior, dificilmente será possível ao AD encontrar um

automóvel ideal, dado que estamos perante critérios tipicamente conflitantes, uma vez que um aumento da potência tende a implicar um preço mais elevado, assim como um acréscimo nos consumos do automóvel, o que restringe a possibilidade de encontrar um ótimo transversal aos três objetivos envolvidos. O que será possível é determinar “boas” soluções que correspondam a um compromisso razoável entre todos os objetivos envolvidos e, se possível, que satisfaçam a vontade do AD.

A programação matemática multiobjetivo compreende o estudo de problemas que possuem a seguinte estrutura: mais do que uma função objetivo, que se pretendem maximizar ou minimizar, e um conjunto de restrições (Cohon, 1978).

Genericamente, o modelo de programação matemática multiobjetivo que será utilizado neste estudo pode expressar-se do seguinte modo:

$$\begin{aligned}
 & \max(\min) \ z_1(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \\
 & \quad \quad \quad \vdots \\
 & \max(\min) \ z_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \\
 & \quad \quad \quad \vdots \\
 & \max(\min) \ z_p(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \\
 & \text{sujeito a:} \\
 & \quad r_1(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \leq 0 \\
 & \quad \quad \quad \vdots \\
 & \quad r_k(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \leq 0 \\
 & \quad \quad \quad \vdots \\
 & \quad r_m(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \leq 0
 \end{aligned}$$

onde $x_1, \dots, x_j, \dots, x_n$ são as variáveis de decisão.

As funções objetivo $z_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n)$, em que $i = 1, \dots, p$, e $r_k(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n)$, com $k = 1, \dots, m$, são funções de variáveis de decisão e de parâmetros.

Ao conjunto de soluções, $(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n)$, que satisfazem todas as restrições $r_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n) \leq 0, i = 1, \dots, m$, dá-se o nome de *região admissível* no espaço de decisão (X).

Para além disso, o conjunto das imagens das soluções admissíveis, utilizando as funções objetivo $z_i(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n), i = 1, \dots, p$, designa-se por *região admissível no espaço dos objetivos*.

Neste contexto, e no caso dos problemas multiobjetivo, torna-se importante determinar as soluções em que não é possível melhorar uma das funções objetivo sem piorar, pelo menos, uma das restantes. Estas soluções são designadas por soluções eficientes ou, ainda, por soluções ótimas de Pareto, em homenagem ao economista italiano Vilfredo Pareto (1848-1923), um dos primeiros a explicitar o interesse na sua determinação. Assim, a relevância da noção de solução ótima, no mono-objetivo, dá lugar, no campo do multiobjetivo, ao interesse da noção de solução eficiente, a saber (considerando-se a maximização do valor de todas as funções objetivo):

Definição 6 (Solução eficiente) *Uma solução admissível $x \in X$ diz-se eficiente sse não existir outra solução admissível x' tal que $z_i(x') \geq z_i(x), i = 1, \dots, p$ e $z_i(x') > z_i(x)$ para pelo menos um i .*

É, ainda, habitual designar do seguinte modo a imagem de soluções eficientes no espaço dos objetivos (Steuer, 1986):

Definição 7 (Solução não dominada) *A imagem de uma solução eficiente no espaço dos objetivos designa-se por solução não dominada. Assim, se $x \in X$ é uma solução eficiente, então $(z_1(x), \dots, z_p(x))$ é uma solução não dominada.*

De modo a que estas noções sejam mais facilmente entendidas, imaginemos, por exemplo que, em resultado do seu processo de fabrico, uma empresa pretende maximizar os seus lucros (z_2) e, simultaneamente, tenciona minimizar o impacto ambiental (z_1), decorrente dos resíduos provocados pelo mesmo. Acontece que esta empresa tem capacidade para realizar, nas suas linhas de produção, dois tipos de produtos: x_1 e x_2 . Respetivamente, o primeiro é um produto totalmente ecológico necessitando apenas de materiais reciclados para ser efetuado, porém, devido à sua baixa durabilidade, o interesse do mercado pelo mesmo é reduzido, refletindo-se negativamente na quantia pecuniária disposta a pagar pelos clientes, na aquisição do mesmo. Por outro lado, o produto inovador x_2 é o último grito no setor e não possui qualquer concorrência no mercado, sendo, portanto, altamente atrativo para a empresa em termos monetários mas, tendo sido desenvolvido recentemente, ainda não existe um processo de fabrico amigo do ambiente para o mesmo. Assim, entre todas as

combinações possíveis dos dois produtos, o gestor de produção da empresa identificou as soluções eficientes/não dominadas que se ilustram na figura seguinte.

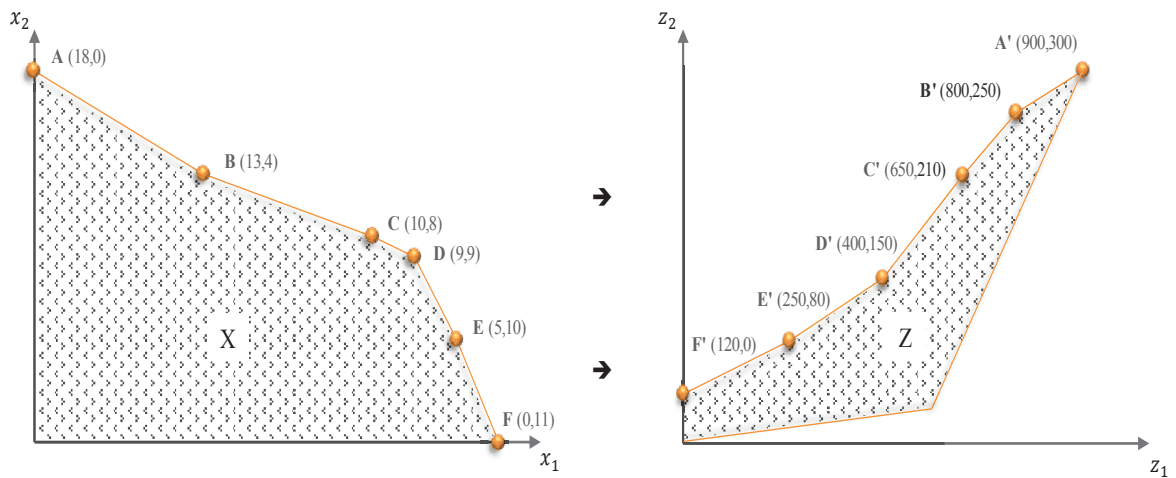


Figura 7 – X representa a região admissível do problema no espaço (das variáveis) de decisão e Z no espaço dos objetivos.

Como se pode ver acima, à esquerda encontra-se destacado o conjunto de todas as soluções eficientes, correspondentes a diferentes níveis de utilização de ambos os produtos, que, naturalmente, depois se refletem no espaço dos objetivos, à direita, sob a forma de valores nas funções objetivo, dando origem às respetivas soluções não dominadas.

Poderá aferir-se, também na figura anterior, que não há uma solução que optimize simultaneamente as duas funções objetivo do problema. A função objetivo z_1 é otimizada na solução eficiente $x = (0,11)$, ponto F, onde $z_1 = 0$ e $z_2 = 120$. Por sua vez, a função objetivo z_2 é otimizada na solução eficiente $x = (18,0)$, ponto A, em que $z_1 = 300$ e $z_2 = 900$. Entre estas duas últimas soluções, existem ainda as soluções intermédias B, C, D e E.

Tendo isto em consideração, enquanto a designação de solução eficiente se refere, geralmente, a pontos do espaço de decisão, a definição de solução não dominada utiliza-se para pontos do espaço dos objetivos. Contudo, quando utilizadas de forma genérica, nesta dissertação, não se fará a distinção entre ambas.

Adicionalmente, torna-se também importante referir que ao conjunto completo das soluções não dominadas dá-se o nome de fronteira de Pareto (FP). De seguida, apresenta-se uma figura que ilustra essa mesma fronteira, em que ambas as funções objetivo se pretendem maximizar, exemplo esse retirado e adaptado de Zitzler (1999).

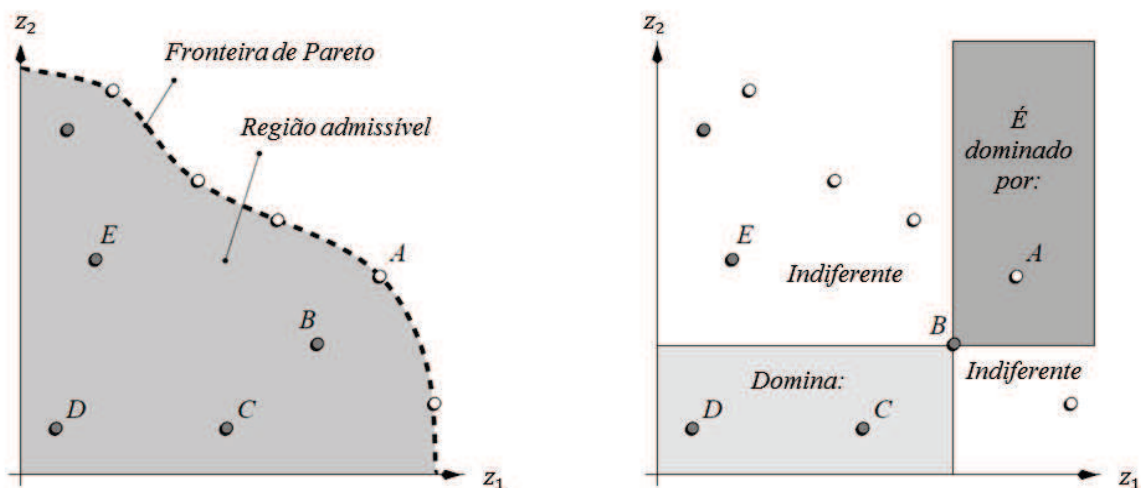


Figura 8 - Exemplo ilustrativo de uma fronteira de Pareto (à esquerda) e de um possível relacionamento entre as soluções (à direita).

Esta figura possibilita-nos perceber de forma intuitiva algumas noções pertinentes acerca da temática do multiobjetivo. Para tal, utilizemos novamente o exemplo da compra de um automóvel e assumamos que os dois objetivos da figura acima são a potência do motor (z_1) e a poupança (z_2), montante remanescente após a compra tendo em conta um determinado valor de referência, sendo portanto dois objetivos que, logicamente, se pretendem maximizar e sujeitos a certas restrições.

Começemos por referir algumas evidências, à luz duma análise mais ampla presente em Zitzler (1999), debruçando-nos sobre o lado esquerdo da Figura 8. Neste caso, é perfeitamente visível que a solução representada pelo ponto B é melhor que a solução representada pelo ponto C, isto porque, corresponde a um automóvel que conjuga maior potência com uma poupança superior. De forma semelhante, também se poderá dizer que a solução C é sempre preferível em relação à D, uma vez que, apesar de proporcionarem poupanças idênticas, C permite obter uma potência superior. Relativamente às soluções B e E, não é possível determinar conclusões sobre qual das duas é preferível. De facto, apesar de B apresentar uma potência superior, a solução E está associada a uma poupança maior, significando isto, que nenhuma destas soluções é capaz de dominar a outra em todos os aspetos considerados.

No que se refere ao lado direito da figura anteriormente considerada, a região representada a cinzento claro evidencia o espaço das soluções admissíveis que é dominado pela solução B (em conformidade com os conceitos anteriores de solução eficiente e solução não dominada). Por analogia, o espaço a cinzento-escuro representa o conjunto das soluções que dominam a solução B, dado que apresentam valores superiores em ambas as funções

objetivo consideradas. Adicionalmente, qualquer solução que não esteja no interior de ambos os retângulos poderá dizer-se que é indiferente em relação à solução B, isto porque nem dominam nem são dominadas por B.

Verifica-se também que, a solução A não é dominada por nenhuma outra solução, o que significa que a mesma é considerada como solução não dominada, no sentido em que não é possível melhorar nenhum dos objetivos sem causar uma degradação em, pelo menos, um outro objetivo. Assim, o ponto A ilustra um exemplo do conceito de solução eficiente que, conseqüentemente, se espelha no espaço dos objetivos, numa solução não dominada. De igual forma, todos os pontos a branco da Figura 8, onde também se inclui a solução A, representam soluções não dominadas, sendo portanto indiferentes entre si. Em linha com os conceitos referidos nesta secção e aplicados a este exemplo, este conjunto de soluções representa, evidentemente, a fronteira de Pareto. É precisamente tendo em conta estes aspetos que reside a principal diferença relativamente aos problemas mono-objetivo, isto é, não existe uma única solução ótima mas sim um conjunto de soluções apropriadas e candidatas a serem escolhidas pelo AD, por melhor representarem os seus interesses. Deste modo, dado tratarem-se de soluções indiferentes entre si, não se pode afirmar *a priori* que alguma solução seja melhor do que outra. Em última análise, apenas a fronteira de Pareto constitui o conjunto das decisões mais racionais a adotar, sendo que a escolha por uma solução específica deverá ser feita tendo em consideração as preferências particulares do AD.

1.1 Abordagens na resolução de problemas multiobjetivo

Um critério usual de classificação dos métodos para os problemas multiobjetivo consiste no momento de intervenção do AD. Neste caso, os métodos distinguem-se do seguinte modo (Cohon, 1978 e Steuer, 1986):

Métodos com incorporação de preferências *a priori*: nesta abordagem os objetivos são agregados *a priori* numa única função objetivo. O problema passa a ser de natureza mono-objetivo;

Métodos com incorporação de preferências *a posteriori*: as abordagens que contemplam a incorporação *a posteriori* das preferências são também designadas por

abordagens geradoras. Neste caso, todas as soluções eficientes/não dominadas são previamente geradas e o AD faz incidir a sua análise sobre este conjunto;

Métodos com incorporação progressiva de preferências: esta abordagem tem subjacente um protocolo de interação com o AD, onde se articulam fases de cálculo e de reação aos resultados apresentados. Esta reação pode traduzir-se na modificação do problema subjacente, introduzindo restrições adicionais, a que se segue uma nova fase de cálculo.

Tendo em consideração o que foi exposto em ambas as secções anteriores, existem dois desafios que evidentemente surgem na resolução de problemas multiobjetivo (Horn, 1997): idealmente, a determinação do conjunto de todas as soluções eficientes e, conseqüentemente, a decisão de escolher uma em específico. O primeiro desafio prende-se com a existência de grandes e complexos problemas que dificultam a obtenção, em tempo computacional baixo, de toda a fronteira de Pareto. Em segundo lugar, a decisão de escolher uma determinada solução não dominada, de entre várias alternativas, é da responsabilidade do AD e nem sempre será uma tarefa fácil, dado que existirá sempre a necessidade de abdicar de algo para que se possa atingir um determinado compromisso razoável, ao nível dos objetivos, que seja o mais conveniente para o AD e seus respetivos interesses.

Particularmente no contexto do primeiro desafio anterior, importa ainda fazer a distinção entre métodos de resolução exata e métodos de resolução aproximada. Falamos em métodos de resolução exata quando estes têm subjacente a determinação da solução ótima, no caso mono-objetivo, ou de soluções eficientes, no caso multiobjetivo. Pelo contrário, e como o próprio nome indica, nos métodos de resolução aproximada não existe garantia de que se obtêm as soluções ótimas nem a totalidade das soluções eficientes, se é que alguma das soluções encontradas o é efetivamente. Apesar disso, tal não significa que os últimos métodos tenham menos valor que os primeiros. Na verdade, existem problemas que pela sua grandeza e complexidade se tornam especialmente difíceis de resolver, sendo, muitas vezes, computacionalmente inviável a obtenção da sua solução ótima ou totalidade de soluções eficientes. Nestes casos, o recurso a métodos de resolução aproximada é de grande relevância na determinação de soluções que representem um compromisso valioso entre qualidade e esforço despendido para obtenção das mesmas. Como exemplo de procedimentos de resolução aproximada poder-se-ão referir as heurísticas. Esta última palavra, deriva do termo grego “heuriskein”, que significa encontrar ou descobrir (Reeves, 1993). Neste caso, o termo é utilizado com o significado de pesquisa de soluções e pode ser descrito da seguinte forma:

Definição 8 (Heurística) *Uma heurística é uma técnica de pesquisa, que procura encontrar boas soluções num tempo computacional razoável, onde a admissibilidade e otimalidade das mesmas não é exigida, nem mesmo a quantificação da sua proximidade à solução ótima.*

Existem ainda processos mais elaborados de pesquisa, onde ocorre articulação e integração de várias heurísticas. Estes processos são designados por *meta-heurísticas*. As meta-heurísticas surgiram nos inícios dos anos 80 e constituem procedimentos iterativos construídos para resolver problemas de otimização difíceis.

Em Osman (1995) pode ser encontrada a seguinte definição de meta-heurística:

Definição 9 (Meta-heurística) *Uma meta-heurística é um processo iterativo de geração de soluções que guia uma heurística subordinada através da combinação inteligente de diferentes conceitos para descobrir e explorar o espaço de soluções, utilizando estratégias de aprendizagem para estruturar a informação por forma a encontrar boas soluções de um modo eficiente.*

A título meramente indicativo, pois não serão utilizadas nesta dissertação, as meta-heurísticas mais conhecidas e utilizadas são os *algoritmos genéticos* (AG), *simulated annealing* (SA) e a *pesquisa tabu* (PT). Uma descrição adequada das mesmas, entre outras, pode ser consultada, por exemplo, em Reeves (1993).

De realçar que esta dissertação irá incidir sobre os métodos com incorporação de preferências *a posteriori*, ou também designados de geradores, optando por uma via de resolução aproximada. Mais detalhadamente, irão propor-se heurísticas tendo como objetivo final a tentativa de gerar a FP do problema.

1.2 Medidas de avaliação em problemas multiobjetivo

Como facilmente se compreende, seria desejável numa abordagem geradora conseguir determinar a totalidade das soluções não dominadas, isto é, a fronteira de Pareto completa. Contudo, pelas razões enunciadas na secção anterior, tal é frequentemente inviável.

Neste sentido, de acordo com Zitzler (1999), a finalidade de um determinado método/técnica de procura de soluções, num problema multiobjetivo, pode ser expresso cumulativamente pelos seguintes três objetivos:

- A distância entre a fronteira não dominada obtida (e.g., através de uma heurística ou meta-heurística) e a verdadeira fronteira de Pareto, deve ser minimizada;
- É desejável uma boa distribuição (na maioria dos casos uniforme) das soluções encontradas;
- A propagação da fronteira não dominada obtida deve ser maximizada, ou seja, para cada objetivo uma ampla extensão de valores deve ser coberta pelas soluções não dominadas sugeridas.

Assim, a avaliação de desempenho que incide sobre diferentes métodos, em contexto multiobjetivo, deve entrar em linha de conta com estes três critérios (Zitzler, 1999).

Na literatura, existem vários exemplos de tentativas para formalizar os três objetivos referidos acima através de medidas quantitativas específicas. Alguns destes podem ser vistos em Zitzler (1999) e incluem as medidas de avaliação de desempenho introduzidas por Esbensen & Kuh (1996), Fonseca & Fleming (1996) e, relativamente à avaliação da distância de uma determinada fronteira não dominada à fronteira de Pareto, foram destacados os estudos de Rudolph (1998) e Veldhuizen & Lamont (1998). Excetuando-se Fonseca & Fleming (1996), todas as restantes medidas possuem as suas limitações específicas, sobretudo associadas à não contemplação de alguns dos três objetivos mencionados anteriormente. Relativamente a esta última medida de avaliação, a sua principal desvantagem prende-se com a incapacidade de expressar as diferenças de qualidade entre métodos, isto é, quão melhor é um método de otimização em relação a outro (Zitzler, 1999).

No seu estudo propriamente dito, Zitzler (1999) utilizou duas medidas distintas para a avaliação de procedimentos meta-heurísticos: uma que é independente da escala, ou seja,

que não necessita que os valores das funções objetivo sejam ajustados, mesmo que a magnitude de cada objetivo seja consideravelmente diferente, e uma outra medida dependente da escala.

Relativamente à primeira, esta avalia quanto do espaço dos objetivos é fracamente dominado por uma determinada fronteira não dominada. Ainda nesta foi introduzido um segundo indicador de modo a permitir que dois conjuntos possam ser comparados entre si.

No que se refere à segunda medida utilizada, esta constitui uma alternativa em relação à primeira e permite que cada um dos três critérios (distância, distribuição e propagação) possa ser avaliado separadamente. Apesar de tal contribuir para uma comparação de desempenho mais rigorosa, esta medida implica, como referido anteriormente, a desvantagem de ser uma métrica dependente da escala dos objetivos. De notar que os conteúdos dos parágrafos anteriores foram analisados apenas de uma forma superficial mas podem ser vistos numa perspetiva mais detalhada em Zitzler (1999).

Uma vez que nesta dissertação não serão desenvolvidas experiências computacionais alargadas, e por simplicidade, serão apenas utilizadas, respetivamente, como medidas de avaliação de eficácia e eficiência, das diferentes heurísticas propostas, os dois indicadores que abaixo se apresentam. As características desejáveis de uma boa aproximação, referidas no início desta secção, apenas serão avaliadas nos exemplos analisados através de uma inspeção visual, confrontando a verdadeira FP com a fronteira obtida.

Indicadores de avaliação utilizados:

- $\% \text{ da fronteira de Pareto obtida} = \frac{N^{\circ} \text{ de soluções não dominadas exatas obtidas}}{N^{\circ} \text{ total de soluções não dominada exatas}}$
- $\text{Eficiência} = \frac{N^{\circ} \text{ de soluções não dominadas exatas obtidas}}{N^{\circ} \text{ total de soluções propostas}}$

O primeiro indicador tem em consideração não só o número de soluções não dominadas exatas encontradas mas também o número total de soluções da FP do problema, o que se traduz numa forma minimamente adequada para aferir o conceito de eficácia.

Relativamente à eficiência, será averiguado a existência do importante compromisso entre a qualidade das soluções propostas e o esforço despendido na obtenção das mesmas. Neste sentido, por exemplo, uma taxa de eficiência igual a 40% pode ser interpretada da

seguinte maneira: em cada 100 soluções propostas, em média, 40 são soluções não dominadas exatas.

Poderá, portanto, constatar-se que ambos os indicadores variam entre 0% e 100%, sendo que quanto mais próximos estiverem do seu limite superior, melhor qualidade terá a heurística.

Evidentemente, deverá ser realçado que nenhum destes indicadores reflete de forma adequada os três objetivos referidos no início desta secção. Inclusivamente, em problemas mais complexos, é comum conseguir-se obter somente uma “boa” aproximação à FP. Nestes casos, ambos os indicadores apresentariam o valor de zero quando na verdade o método até pode ser bastante razoável.

Por estas razões, sempre que tal for apropriado, nesta dissertação, será preferível retirar ilações acerca da qualidade das heurísticas através de uma simples análise gráfica que compare a FP do problema com a melhor fronteira não dominada que foi determinada pela respetiva heurística.

2. O modelo

Para concretizar o objetivo desta dissertação, será utilizado o modelo matemático desenvolvido por Gomes da Silva & Carreira (2016). A pertinência e interesse do mesmo relaciona-se com o facto de focar a questão da GPR, contemplando o efeito de aprendizagem, ao mesmo tempo que incide sobre os três principais objetivos da gestão de projetos, já referidos anteriormente, que são: o tempo, o custo e a qualidade. De acordo com os conteúdos do artigo anterior, uma explicação sucinta deste modelo será apresentada de seguida.

No seu estudo, os autores abordam um problema de multi-projetos em que os vários projetos a efetuar são exatamente iguais, no que se refere ao número de atividades e às suas relações de precedência. Assim, cada um dos projetos tem o mesmo conjunto de restrições de precedência, que representam a sequência lógica pela qual as atividades devem ser realizadas. De notar que não existem restrições de precedência entre os projetos, mas o número de equipas utilizado em cada atividade impõe restrições lógicas relativamente ao momento temporal em que as atividades dos diferentes projetos podem ser executadas. O tempo necessário para desempenhar uma determinada atividade pode diminuir, caso a mesma seja executada, pelo menos, mais do que uma vez por uma mesma equipa, seguindo o comportamento previsto pelo modelo log-linear de curva de aprendizagem. Com efeito, a única variável que terá impacto sobre a duração das atividades é o efeito de aprendizagem. Neste sentido, não será tida em consideração a possibilidade de alocar recursos adicionais de modo a reduzir o tempo necessário para executar uma dada atividade.

Neste problema, cada projeto repetitivo tem uma data de entrega específica e, para desempenhar as atividades, são utilizados recursos que se assumem disponíveis a qualquer momento da execução dos projetos. Para representar o uso destes recursos, utilizam-se dois tipos de custos: fixos e variáveis. Estes últimos dependem da duração das atividades. Adicionalmente, se o projeto for concluído antes da sua data de entrega, há lugar a um bónus que é proporcional à dimensão da antecipação. Pelo contrário, caso o projeto seja concluído após a data de entrega, existe uma penalização que, na mesma lógica que o bónus, é proporcional à extensão do atraso. Neste modelo, o GP tem capacidade de influenciar as dimensões tempo, custo e qualidade. Assim, a dimensão tempo é representada por uma função de minimização do atraso máximo na conclusão dos vários projetos repetitivos (ou maximização da antecipação, no caso de todos os projetos serem entregues dentro do prazo).

Para a dimensão custo é tido em consideração a minimização dos custos totais e, por último, a dimensão da qualidade é representada pela minimização do número total de equipas usadas em todos os projetos.

Enquanto que as duas primeiras funções objetivo referidas anteriormente têm um fundamento relativamente intuitivo, a relação entre o número de equipas utilizado e a qualidade carece de uma explicação extra. Como neste modelo o que maximiza a qualidade é a utilização de um número mínimo de equipas, daqui se poderá depreender que isso é equivalente a dizer-se que a qualidade aumenta quanto maior for o aproveitamento da aprendizagem. Isto porque, no limite mínimo, cada atividade é executada por uma única equipa ao longo dos vários projetos repetitivos, conferindo a possibilidade de beneficiar ao máximo do efeito de aprendizagem. Contudo, isto ainda não permite desvendar o porquê de a qualidade estar positivamente relacionada com o aproveitamento da aprendizagem. Assim, para o explicar torna-se particularmente útil a referência a Thomas *et al.* (1986). Estes autores explicam detalhadamente o porquê de o desempenho aumentar à medida que uma atividade é repetida sucessivamente e apontam, entre outras, as seguintes razões: aumento da familiarização dos trabalhadores na execução das suas tarefas; melhoria na coordenação entre trabalhadores e no uso de equipamentos; melhor organização do trabalho; aperfeiçoamento do acompanhamento e da supervisão realizados pela gestão; desenvolvimentos de métodos e técnicas mais eficientes; aperfeiçoamento da eficiência dos sistemas de fornecimento e manuseio de materiais; maior estabilidade, conduzindo a menores modificações e correções de falhas.

Atendendo a todos estes fatores, agora é simples de se perceber o motivo pelo qual se pressupõe que quanto maior for o aproveitamento do efeito de aprendizagem maior tenderá a ser a qualidade, aqui considerada apenas relativamente ao produto final (projeto). De facto, faz perfeito sentido que, por exemplo, o número de falhas e erros diminua devido a praticamente todas as dimensões que Thomas *et al.* (1986) consideram que a aprendizagem tem capacidade de melhorar.

Adicionalmente, são assumidos os seguintes pressupostos:

1. Cada equipa de trabalhadores é especializada numa única atividade;
2. Uma mesma equipa de trabalhadores não pode executar a sua atividade em mais do que um projeto simultaneamente;
3. A execução de uma atividade não pode ser interrompida;

4. A sequência de realização dos projetos é única para todas as atividades (o projeto 1 é o primeiro a ser executado, o projeto 2 é o segundo, e assim sucessivamente);
5. Em cada atividade, todas as equipas de trabalhadores são idênticas (a duração inicial é a mesma, assim como a taxa de aprendizagem estabelecida);
6. Sem perda de generalidade, se o número de equipas de trabalhadores (n) a executar a atividade i for menor do que o número de projetos (N), cada um dos projetos de 1 a n é executado por uma equipa diferente e essa ordem é mantida inalterada até ser executada a atividade i do projeto N ;
7. A aprendizagem é representada pela curva (1) enunciada na secção 1 – Parte I.

O modelo envolve os seguintes parâmetros:

- m – número de atividades em cada projeto;
- N – número de projetos (também representa o número máximo de equipas de trabalhadores disponíveis para cada atividade);
- D_i – duração inicial da atividade i (i denota uma atividade em que $i = 1, \dots, m$);
- r_i – taxa de aprendizagem da atividade i ;
- E_j – data de entrega do projeto j (j denota um projeto em que $j = 1, \dots, N$);
- f_i – custo fixo da atividade i (independentemente da sua duração), reflete o custo dos materiais;
- γ_i – custo variável da atividade i (proporcional à sua duração), expressa os custos da mão-de-obra e utilização de equipamentos;
- δ – penalização/bónus monetário por período de tempo.

As variáveis de decisão do modelo são:

- t_{ij} – momento de início da atividade i no projeto j ;
- d_{ij} – duração da atividade i no projeto j ;
- v_{ij} – número de projetos efetuados pela equipa que executa a atividade i no projeto j , até ao projeto j , inclusive;
- y_i – número de equipas a trabalhar na atividade i ;

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{se } y_i = K \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases},$$

onde $k = 1, \dots, N$.

Por fim, o modelo é dado por:

$$\text{Min } z_1 = \sum_{i=1}^m y_i \text{ (Número total de equipas de trabalhadores)}$$

$$\text{Min } z_2 = \alpha \text{ (Atraso máximo)}$$

$$\text{Min } z_3 = \sum_{i=1}^m \left(Nf_i + \sum_{j=1}^N \gamma_i d_{ij} \right) + \delta \sum_{j=1}^N (\beta_j - E_j) \text{ (Custos totais)}$$

s. a.

$$t_{ij} \geq t_{i'j} + d_{i'j}, \forall_i \text{ com a atividade precedente } i', j = 1, \dots, N \quad (1)$$

$$\alpha \geq t_{ij} + d_{ij} - E_j, \forall_i \text{ sem atividade subsequente}, j = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$\beta_j \geq t_{ij} + d_{ij}, \forall_i \text{ sem atividade subsequente}, j = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$x_{i1} + 2x_{i2} + 3x_{i3} + \dots + Nx_{iN} = y_i, i = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$\sum_{K=1}^N x_{ik} = 1, i = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$d_{ij} = D_i v_{ij}^{\frac{\log r_i}{\log 2}}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, N \quad (6)$$

$$v_{ij} \geq \frac{j}{1}x_{i1} + \frac{j}{2}x_{i2} + \frac{j}{3}x_{i3} + \dots + \frac{j}{N}x_{iN}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$v_{ij} \leq \frac{j}{1}x_{i1} + \frac{j}{2}x_{i2} + \frac{j}{3}x_{i3} + \dots + \frac{j}{N}x_{iN} + 0.999, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, N \quad (8)$$

$$t_{ij} \geq (t_{i,j-1} + d_{i,j-1})x_{i1} + (t_{i,j-2} + d_{i,j-2})x_{i2} + \dots + (t_{i,j-(N-1)} + d_{i,j-(N-1)})x_{i,N-1},$$

$$i = 1, \dots, m, j = y_i + 1, \dots, N \quad (9)$$

$$t_{ij,y_i} \geq 0, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, N \quad (10)$$

$$v_{ij} \text{ inteiro } i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, N \quad (11)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\}, i = 1, \dots, m, k = 1, \dots, N \quad (12)$$

No modelo acima, a restrição (1) assegura as relações de precedência entre as atividades dentro de cada projeto, a restrição (2) define o atraso máximo na entrega dos projetos. Por sua vez, a restrição (3) representa as datas de conclusão dos projetos e a restrição (4) determina o número de equipas a trabalhar em cada atividade. No que se refere a esta última restrição, por exemplo se a atividade i for efetuada por quatro equipas, então $x_{i4} = 1$ (com $x_{ik} = 0$ em que $k \neq 4$) e, finalmente o número de equipas é determinado por: $y_4 = 4 * 1 = 4$.

A restrição (5) evidencia que deve haver apenas um único número de equipas a efetuar cada atividade. As restrições (7) e (8) são destinadas a determinar, utilizando restrições lineares, o maior número inteiro não superior a j/y_i . Por exemplo, se houver três equipas a trabalhar na atividade i ($x_{i3} = 1, y_i = 3$), então no projeto $j = 4$ essa atividade será desempenhada pela equipa 1, que irá executar a atividade pela segunda vez consecutiva. Tal acontece porque se assume que a equipa 1 será a primeira, entre as 3 equipas afetas à atividade, a finalizar a sua execução anterior, neste caso no projeto $j = 1$, e como tal fica encarregue de realizar a sua atividade pela segunda vez no projeto $j = 4$, de modo a permitir que a mesma possa iniciar o mais cedo possível. Ainda, devido ao sexto pressuposto referido anteriormente, a equipa 1 irá realizar, posteriormente, as atividades dos projetos $j = 7, 10, 13$ e assim sucessivamente.

Note-se também que $v_{i4} \geq 1.333$ e $v_{i4} \leq 2.332$, resultando em $v_{i4} = 2$, dada a restrição (11). Com efeito, a variável v_{ij} define, portanto, a fase na curva de aprendizagem em que se encontra a equipa que executa a atividade i no projeto j , sendo utilizada para determinar a duração dessa execução a equação (6) do modelo log-linear. Por outro lado, a restrição (9) impõe um limite inferior para o começo da atividade i no projeto j , que

corresponde ao momento em que a equipa que executa essa atividade termina a sua execução anterior. Por exemplo, se houver duas equipas a efetuar a atividade i ($x_{i2} = 1, y_i = 2$), então, no projeto $j = 3$, a atividade i só pode começar quando a equipa que a irá executar (equipa 1) finalizar a sua execução anterior (projeto $j = 1$). As restantes restrições (10), (11) e (12) referem-se à natureza das variáveis de decisão (não negativas, contínuas, inteiras e binárias).

Resumidamente, este modelo não linear tem, respetivamente, $mN + N + 1, m(N - 1), mN$ variáveis de decisão contínuas, inteiras e binárias. Veja-se na tabela seguinte algumas dessas possibilidades:

#	m	N	V. contínuas	V. inteiras	V. binárias	Nº total de variáveis
1	3	2	9	3	6	18
2	6	3	22	12	18	52
3	3	6	25	15	18	58
4	10	10	111	90	100	301
5	20	50	1051	980	1000	3031
6	120	100	12101	11880	12000	35981
7	750	900	675901	674250	675000	2025151

Tabela 4 – Alguns cenários possíveis para a repartição do número total de variáveis de decisão.

Como em cada uma das m atividades, no conjunto dos N projetos, podem ser utilizadas no máximo N equipas de trabalhadores, existem, portanto, N^m soluções possíveis para determinar o número de equipas no desenvolvimento dos N projetos. Devido a isso, é notório que o problema irá aumentar amplamente a sua dimensão somente por pequenos aumentos em m e/ou N , como pode ser verificado na Tabela 5.

#	m	N	N^m
1	2	2	4
2	3	3	27
3	3	6	216
4	6	3	729
5	7	7	823543
6	7	8	2097152
7	8	7	5764801
8	9	9	387420489
9	10	10	1E+10

Tabela 5 – Algumas soluções possíveis para determinar o vetor do número de equipas.

Neste sentido, a complexidade combinatória do modelo resulta da necessidade em decidir o número de equipas a efetuar cada atividade. De facto, para um vetor fixo de

números de equipas a trabalhar em cada atividade (y_1, y_2, \dots, y_m), o modelo torna-se linear com apenas variáveis contínuas (é de notar que, neste caso, o conjunto das restrições (4)-(8) pode ser removido, assim como as variáveis y_i, v_{ij}, x_{ik}). Nestas condições, através da aplicação do CPM, podem ser atingidos em simultâneo os ótimos das funções objetivo z_2 e z_3 (neste caso, a primeira componente de z_3 torna-se constante).

2.1 *Trade-off* estratégico e complexidade do modelo matemático

Como já havia sido enunciado anteriormente no final da secção 2.3 – Parte I, fazendo referência a Shtub *et al.* (1996), também no modelo anterior, se bem que de uma forma mais complexa, contemplar de modo integrado todos os fatores sobre os quais o mesmo incide pode, de modo geral, dar origem a um *trade-off* estratégico que é reforçado pelo facto de as três principais dimensões da gestão de projetos serem, frequentemente, conflitantes entre si. Adicionalmente, deve reiterar-se que para o nosso caso a interpretação do conceito de qualidade e a forma através da qual se pode promover a mesma são ligeiramente diferentes. De realçar que a particularidade de se introduzir o efeito de aprendizagem implica, naturalmente, uma complexidade acrescida.

Tendo em atenção a problemática do modelo, o ideal para o GP seria efetuar os vários projetos repetitivos ao menor custo possível, garantindo a não existência de atrasos ou até mesmo com antecipações e, simultaneamente, maximizando a qualidade. Porém, tal representa habitualmente um cenário utópico, pois, de facto, não se pode ter tudo e é inevitável que exista sempre um certo grau de abdicção.

Assim, relativamente ao problema particular sobre o qual esta dissertação incide, e apesar de se terem focado apenas na minimização dos custos, Shtub *et al.* (1996) identificaram duas considerações potencialmente conflituosas entre si e que também se podem verificar neste modelo, são elas:

- A necessidade de concluir cada projeto respeitando a sua data de entrega;
- O desejo em beneficiar dos efeitos de aprendizagem.

De acordo com estes autores, devido à primeira consideração, existe uma tendência para se utilizarem múltiplas equipas, assegurando uma execução simultânea dos projetos

repetitivos, de modo a que se cumpram mais facilmente os prazos de entrega. No entanto, o segundo fator encoraja a atribuição de muitas atividades a uma mesma equipa, no sentido de se aproveitar ao máximo a melhoria na produtividade, resultante da aprendizagem.

Evidentemente que tudo dependerá dos parâmetros do problema mas, regressando ao modelo de Gomes da Silva & Carreira (2016), facilmente se percebem alguns desafios estratégicos adicionais que podem surgir². Assim, por um lado o efeito de aprendizagem pode resultar em durações menores para as atividades, permitindo maior rapidez na execução dos projetos e, conseqüentemente, possibilitando uma poupança ao nível dos custos variáveis e também no que se refere às penalização/bónus. Desta forma, por via da aprendizagem, pode ser possível beneficiar diretamente as funções objetivo z_2 , z_3 e, como para tal é necessário utilizar um número inferior de equipas, também z_1 . Por outro lado, a alocação de múltiplas equipas a uma mesma atividade pode contribuir para um aceleração superior (em comparação com o da aprendizagem) na execução dos vários projetos, dado que elimina algumas precedências das equipas em relação às suas execuções anteriores. Neste sentido, pode ser privilegiada uma redução dos custos inerentes às entregas após a data devida e usufruir de eventuais bónus de antecipação, melhorando as funções objetivo z_3 e, possivelmente, z_2 . Porém, neste último caso, a necessidade de se utilizarem mais do que m equipas deteriora a função objetivo z_1 .

Poderá então deduzir-se que, no contexto do problema, o único dado adquirido que existe é que a função objetivo z_1 é prejudicada pelo aumento do número de equipas. Resta, assim, saber em qualquer uma das soluções possíveis que estejamos, se do ponto de vista de z_2 e z_3 será mais vantajoso eliminar-se a restrição (9) das atividades ou manter o aproveitamento da aprendizagem.

Em suma, a complexidade acrescida deste modelo matemático resulta da interação conjunta entre todos os *trade-offs* estratégicos mencionados e, logicamente, do seu impacto nas funções objetivo. Adicionalmente, deverá ainda ter-se em conta que, conforme se pode conferir na Tabela 5, pequenas variações positivas nos parâmetros N e, sobretudo, m traduzem-se num aumento elevado do número de combinações possíveis para o vetor do número de equipas.

² Note-se que estes últimos autores consideram um projeto como sendo um conjunto interdependente de atividades ao contrário do que acontecia em Shtub *et al.* (1996), em que se simplificava o conceito de projeto em apenas uma atividade.

2.2. Casos extremos: ausência de aprendizagem e aprendizagem máxima

De modo a permitir uma perceção mais intuitiva dos aspetos fundamentais associados ao modelo matemático anterior e apresentado na secção 2, neste tópico o CPM será utilizado para analisar um exemplo específico, onde serão destacados os aspetos mais relevantes desse modelo. Para tal, serão investigados dois casos extremos desse exemplo correspondentes à utilização de um número total de equipas equivalente a m e $N * m$, respetivamente.

Adicionalmente, determinada por enumeração exaustiva das soluções, será apresentada a fronteira de Pareto referente ao exemplo.

Assim, esta secção servirá, sobretudo, de enquadramento para os conteúdos em que a Parte III irá incidir.

Como nota, torna-se ainda importante referir que, atendendo às críticas enunciadas na secção 2.3 – Parte I inerentes à aplicação do CPM em contexto de GPR, a forma como este método será aplicado nesta dissertação atenua as críticas 2 e 3 da referida secção. Tal acontece porque o efeito de aprendizagem, caso exista, é tido em consideração e, portanto, o carácter repetitivo dos projetos é contemplado. Em segundo lugar, é assegurada a hipótese de manter a continuidade do trabalho das equipas, sendo esta no entanto uma decisão estratégica do gestor de projetos que deve ser analisada e averiguada devido ao *trade-off* exposto na secção 2.1 – Parte II.

2.2.1 Exemplo ilustrativo 1

O exemplo 1 que se segue foi retirado de Gomes da Silva & Carreira (2016). Considere um projeto constituído por seis atividades ($m = 6$). Este projeto tem de ser repetido três vezes ($N = 3$). Adicionalmente, assuma-se que $\delta = 0,8$ e $E_j = 11$, $j = 1, 2, 3$. Além disso, os parâmetros referentes às atividades são apresentados na Tabela 6 e a rede de cada projeto na Figura 9.

i	Di	ri	γ_i	fi
A	2	0,9	0,05	1000
B	3	0,8	0,06	2000
C	4	0,8	0,07	3000
D	3	0,7	0,08	1300
E	5	0,75	0,09	1200
F	6	0,85	0,05	1500

Tabela 6 – Parâmetros das atividades (Exemplo 1).

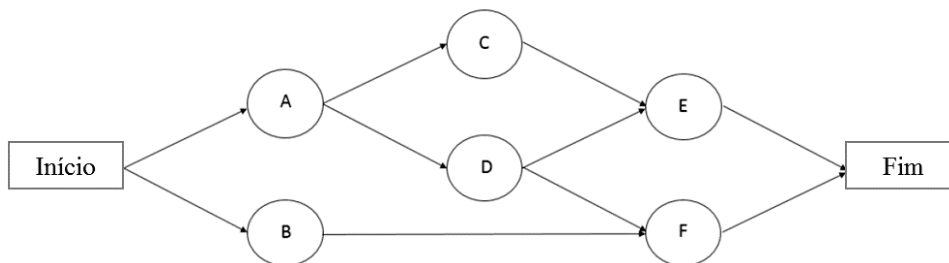


Figura 9 – Rede do projeto (Exemplo 1).

Para melhor se perceber a dinâmica do problema, comecemos por aplicar o CPM ao caso mais simples em que é utilizado um número máximo de equipas para executar as atividades, neste caso serão, portanto, 18 equipas ($N * m$). Agindo assim, obtém-se a seguinte rede integrando a realização dos três projetos:

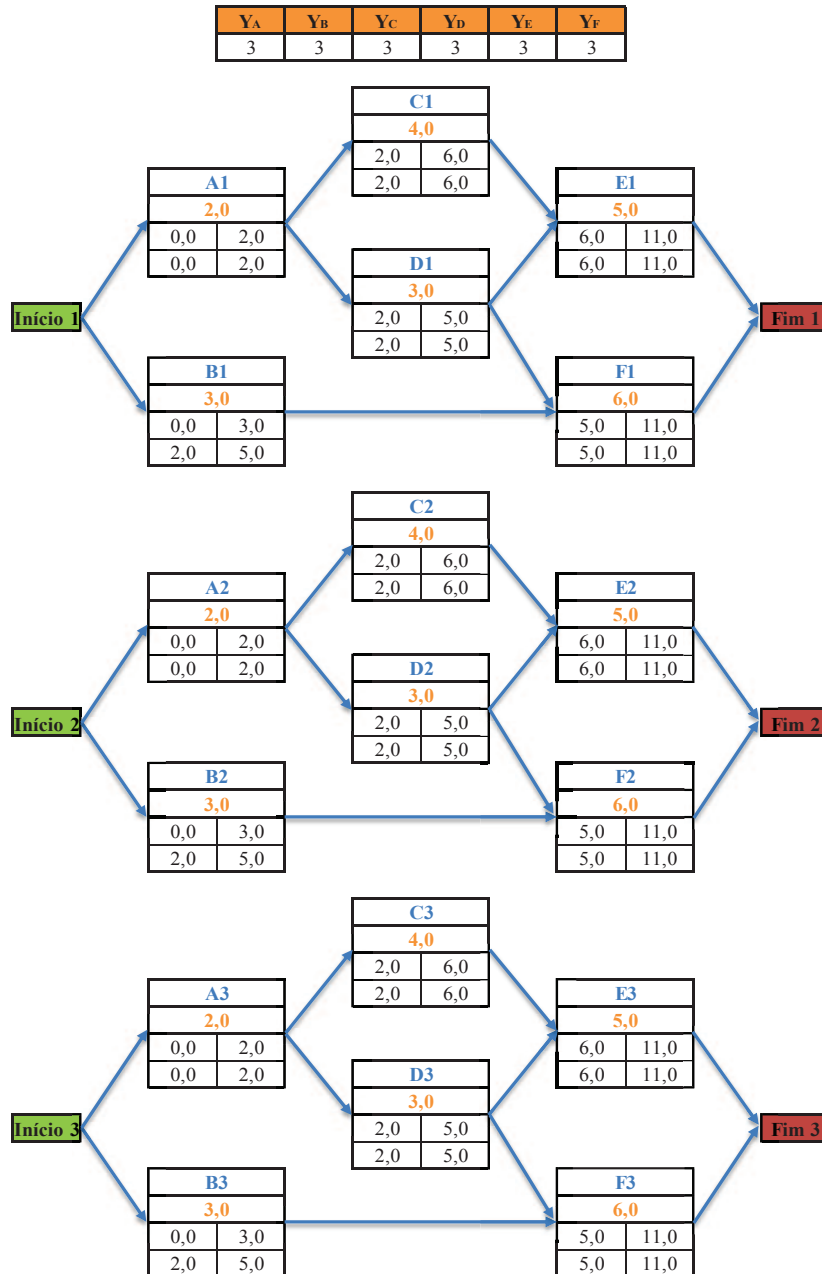


Figura 10 – Aplicação do CPM utilizando-se um total de 18 equipes (Exemplo 1).

Neste caso, uma mesma atividade ao longo dos três projetos é sempre executada por uma equipe diferente e, como tal, não existem quaisquer relações de precedência para além das que determinam a sequência lógica de realização das atividades em cada projeto (Figura 9). Assim, todos os projetos podem ser efetuados simultaneamente e, por isso, apresentam exatamente o mesmo momento de começo e fim. Para além disso, como é óbvio, observa-se que nenhuma equipa usufruiu do efeito de aprendizagem.

Por sua vez, torna-se conveniente agora aplicar o CPM ao extremo oposto à da situação acima representada, ou seja, a um cenário em que se utiliza um número mínimo de equipes para desempenhar as atividades. Neste caso, esse número corresponde a 6 (m) e verifica-se a seguinte rede integrada:

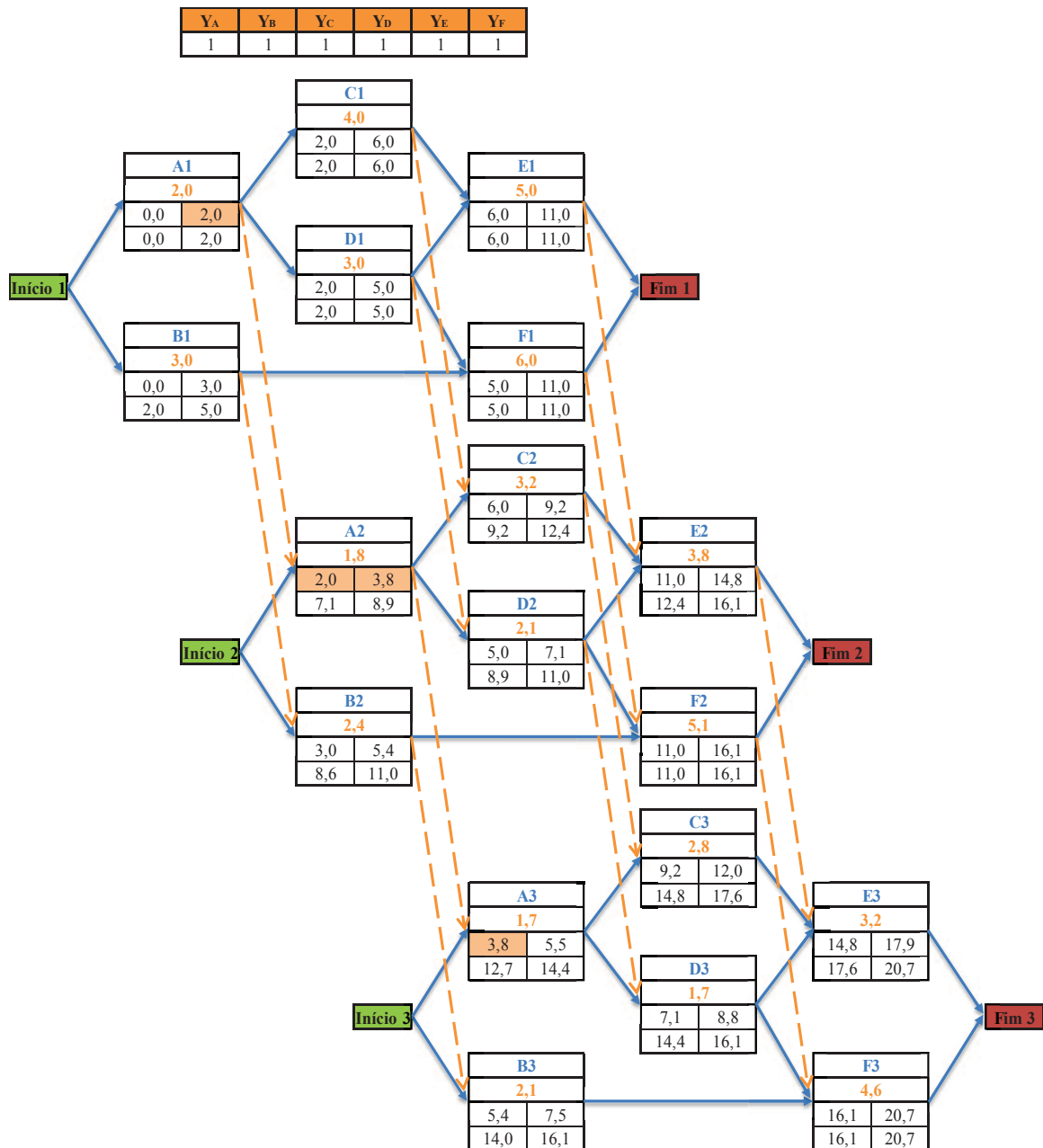


Figura 11 – Aplicação do CPM utilizando-se um total de 6 equipes (Exemplo 1).

Nesta situação, cada atividade é executada de forma sucessiva por uma só equipe ao longo dos três projetos. Assim, para além das restrições de precedência que determinam a sequência lógica de execução das atividades, existem agora restrições adicionais que impõem que uma dada equipe só pode iniciar a atividade i nos projetos $j = 2, 3$ quando finalizar a sua execução anterior no projeto $j - 1$. Este cenário, que diz respeito à restrição

(9) do modelo apresentado, já era perfeitamente visível na Figura 3 da secção 2.3 – Parte I, e a mesma ajuda a perceber melhor esta questão. Tendo isto presente, repare-se, na Figura 11, nas células demarcadas de IMC e FMC da atividade A, assim como nas setas a tracejado que representam a precedência que pode existir entre uma mesma atividade ao longo dos vários projetos. Neste exemplo, como a atividade A é sempre executada por uma mesma equipa, verifica-se que os trabalhos em A2 só podem começar quando terminarem em A1, portanto, no momento temporal 2,0. Do mesmo modo, a atividade A3 só pode ter início aquando A2 terminar, ou seja, no momento temporal 3,8. É, ainda, de realçar que pelo facto de todas as equipas executarem sucessivamente a sua atividade nos três projetos, constata-se que progridem na curva de aprendizagem e, por isso, veem o seu desempenho aumentar (menores tempos de execução), ao contrário do que acontecia no cenário da Figura 10.

Após a exposição anterior, que permitiu compreender melhor a natureza do problema, importa agora exibir o conjunto das soluções não dominadas exatas referente à rede e aos parâmetros do exemplo anterior. Torna-se adequado referir que estas soluções foram determinadas por enumeração exaustiva de todas as combinações admissíveis para o vetor das variáveis de decisão e, seguidamente, filtradas de acordo com a definição de solução não dominada. Antes de observarmos as 16 soluções descobertas, é pertinente notar que neste modelo, seja qual for a rede dos projetos e parâmetros do problema, a solução correspondente a $\sum_{i=1}^m y_i = m$ será sempre eficiente, já que é a única a minimizar a função objetivo z_1 , como pode ser visto, conjuntamente com as restantes soluções eficientes, na tabela seguinte:

Solução não dominada N°:	$Z_1 =$ Número de Equipas	$Z_2 =$ Atraso Máximo	$Z_3 =$ Custo Total	A	B	C	D	E	F
1	6	9,74	30015,70	1	1	1	1	1	1
2	7	6,92	30012,43	1	1	1	1	1	2
3	8	5,10	30010,70	1	1	1	1	2	2
4	9	4,76	30010,47	1	1	1	1	2	3
5	9	5,10	30009,91	1	1	2	1	2	2
6	10	3,80	30008,91	1	1	2	1	2	3
7	11	3,75	30008,73	1	1	2	2	2	3
8	11	5,10	30008,66	2	1	2	2	2	2
9	12	3,20	30008,41	1	1	2	2	3	3
10	12	3,75	30007,63	2	1	2	2	2	3
11	13	3,20	30007,30	2	1	2	2	3	3
12	14	2,51	30006,80	2	1	3	2	3	3
13	15	2,10	30006,21	2	2	3	2	3	3
14	16	1,80	30006,04	2	2	3	3	3	3
15	17	0,40	30004,93	3	2	3	3	3	3
16	18	0,00	30004,65	3	3	3	3	3	3

Tabela 7 – Conjunto das soluções não dominadas exatas (Exemplo 1).

Além disso, complementarmente, uma representação gráfica da fronteira de Pareto pode ser observada na Figura 12.

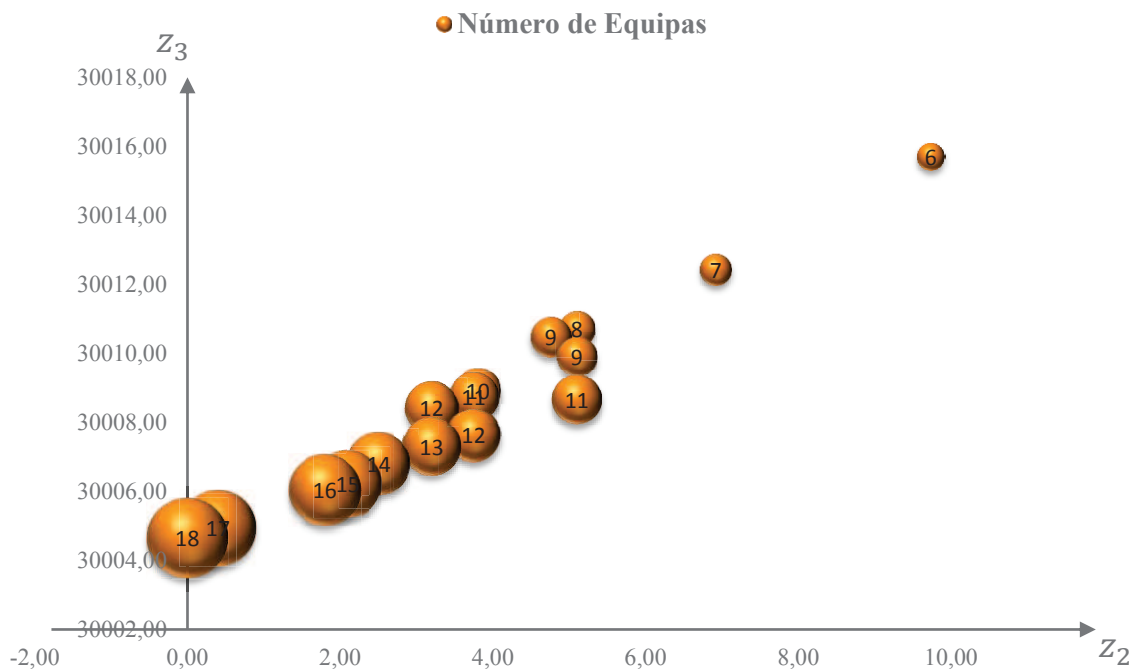


Figura 12 – Fronteira de Pareto (Exemplo 1).

Para este exemplo, é possível verificar que, para cada número total de equipas, existe sempre, pelo menos, uma solução não dominada. Também constata-se que a relação entre custo total e atraso máximo é aproximadamente linear, sendo que à medida que se introduzem equipas adicionais, assiste-se a uma tendência de redução em z_2 e z_3 . Inclusivamente, a solução eficiente correspondente a 18 equipas minimiza simultaneamente z_2 e z_3 , apesar de estar associada à solução que mais deteriora z_1 , isto é, a qualidade. Assim, o aumento de produtividade, tanto ao nível do custo como da duração, em resultado da aprendizagem, não é suficiente, neste caso, para compensar os benefícios em rapidez de execução e, conseqüente, poupança na penalização que a utilização de mais equipas permite. De notar que do ponto de vista dos custos, tal acontece sobretudo devido ao grande fosso entre os parâmetros δ e γ_i .

Tendo sido determinadas as decisões mais racionais (soluções eficientes/não dominadas) a adotar neste problema, o AD poderia agora incidir sobre uma em específico tendo em conta as suas preferências. Acontece que, como mencionado anteriormente, tal foi feito por enumeração exaustiva de todas as 729 combinações possíveis (N^m). Neste sentido, o interesse agora encontra-se em procurar desenvolver formas eficientes de se obterem, desejavelmente, boas soluções.

Parte III – Desenvolvimento e aplicação de heurísticas para a resolução do modelo de GPR

Nesta parte, ir-se-á propor quatro heurísticas para gerar aproximações da fronteira de Pareto do problema multiobjetivo. A primeira heurística é baseada em folgas estáticas, a segunda em folgas dinâmicas, a terceira incorpora, para além de folgas dinâmicas, também a duração inicial e a aprendizagem. Já a quarta heurística é baseada num conceito que será aqui introduzido, nomeadamente o de *contributo crítico válido*. Estas heurísticas serão depois aplicadas a dois exemplos que têm por base a mesma rede de projeto, mas que diferem nos seus parâmetros. Esta secção iniciar-se-á com uma experiência prévia em que se identificam soluções, para o número de equipas em cada atividade, por geração aleatória com base numa distribuição uniforme. Adicionalmente, será também feito um breve enquadramento à classe a que pertencem as quatro heurísticas que ir-se-ão desenvolver.

1. Experiência inicial: atribuição de uma distribuição uniforme

No seguimento do que foi exposto no final da secção anterior, é conveniente nesta fase averiguar qual a qualidade dos resultados que seria de esperar caso se utilizassem probabilidades iguais na atribuição de um número de equipas y_i às atividades, sendo que, conforme já foi referido anteriormente, $y_i \in \{1, \dots, N\}$. Como tal, atribuir probabilidades idênticas é o mesmo que dizer que cada uma das soluções possíveis para y_i terá uma probabilidade de ocorrência igual a $\frac{1}{N}$. Assim, tais resultados serão gerados sem terem na sua base nenhum critério específico e, com efeito, podem ter uma função importante, servindo de termo de comparação para aferir a pertinência das heurísticas que mais à frente serão propostas. Para concretizar esta experiência será utilizado o Exemplo 1 apresentado anteriormente.

Com efeito, para efetuar esta experiência computacional serão realizados três testes distintos, cada um com um número diferente de iterações, correspondente a 5%, 10% e 20% do número total de combinações possíveis para o vetor número de equipas ($3^6 = 729$). Portanto, neste caso, serão utilizados conjuntos de iterações constituídos por 36, 73 e 146 soluções possíveis, respetivamente, sendo que o objetivo é calcular o número de soluções não dominadas exatas encontradas em cada simulação.

De modo a salvaguardar um grau adequado de evidência estatística, serão efetuadas 30 simulações para cada uma das três proporções anteriormente mencionadas, perfazendo um total de 90 simulações.

Devido à impraticabilidade de apresentar detalhadamente todas as simulações e respetivas iterações, será apenas exibido um quadro resumo acompanhado pelos valores médios das medidas de avaliação apresentadas em 1.2 – Parte II.

Simulação N°:	Número de soluções não dominadas exatas encontradas no total das iterações:		
	Exp 5% = 36	Exp 10% = 73	Exp 20% = 146
1	0	3	3
2	0	4	2
3	2	2	6
4	0	2	3
5	3	2	2
6	0	1	2
7	1	1	2
8	1	3	4
9	2	1	3
10	0	1	2
11	0	1	7
12	0	1	4
13	2	3	1
14	0	0	2
15	1	2	1
16	2	2	1
17	3	0	2
18	1	2	3
19	0	1	5
20	2	0	1
21	0	0	3
22	2	1	2
23	1	2	6
24	1	0	3
25	0	1	0
26	1	1	1
27	0	1	2
28	1	1	1
29	1	3	4
30	1	4	1
Total (1)	28	46	79
N° médio de sol. exatas encontradas em cada simulação (2)	0,93	1,53	2,63
Percentagem média da fronteira de Pareto encontrada em cada simulação (3)	5,83%	9,58%	16,46%
Percentagem média de eficiência em cada simulação (4)	2,59%	2,10%	1,80%
Média da percentagem média da fronteira de Pareto encontrada em cada simulação (5)	10,63%		
Média da percentagem média de eficiência verificada em cada simulação (6)	2,17%		

Tabela 8 – Experiência computacional com a atribuição de probabilidades uniformes na distribuição do número de equipas.

Observando a Tabela 8, verifica-se que utilizar uma distribuição uniforme para o número de equipas em cada atividade parece não conduzir a resultados eficazes. De facto, para o principal e mais adequado indicador em análise (3), os resultados não ultrapassam os 16,50%, mesmo utilizando a proporção mais favorável, igual a 20% de todas as possibilidades. Assim, em média, no conjunto de todas as simulações apenas se encontra, em cada uma destas, aproximadamente 10,5% das soluções não dominadas exatas. De igual modo, analisando o critério de eficiência, os resultados não são positivos, demonstrando que esta forma de agir não confere um compromisso razoável entre a qualidade das soluções e o esforço na sua obtenção. De facto, a eficiência média global indica que, aproximadamente em cada 100 soluções propostas, em média, apenas se encontram duas soluções eficientes exatas.

Em suma, esta experiência computacional aponta para a existência de um fraco interesse em se pretender resolver o modelo multiobjectivo por geração aleatória uniforme do número de equipas a realizar cada uma das atividades. Assim, é evidente a necessidade de se desenvolverem métodos que consigam, de certa forma, captar os dados do problema e utilizem esse conhecimento para guiar a tarefa de procurar boas soluções para o problema.

É exatamente para procurar dar resposta a esta necessidade que os conteúdos das seguintes secções irão surgir.

2. Desenvolvimento, enquadramento e princípios essenciais das heurísticas

De modo a procurar solucionar adequadamente o problema sobre o qual esta dissertação incide, nesta secção serão desenvolvidos e aplicados quatro procedimentos heurísticos. Através da sua utilização, pretender-se-á determinar aproximações da fronteira de Pareto para o modelo multiobjectivo apresentado.

Neste sentido, como já havia sido enunciado na secção referente à temática do multiobjectivo, o recurso a métodos de resolução aproximada é uma área de grande interesse, promovendo a procura de soluções que representem um compromisso valioso entre qualidade e o esforço despendido para obtenção das mesmas.

Particularmente, as heurísticas que aqui serão apresentadas possuem uma característica em comum, isto é, todas elas partem da mesma solução inicial correspondente à utilização de um número total de equipas mínimo, ou seja, equivalente a m . Isto sucede por dois motivos fundamentais, que são os seguintes:

- Essa solução minimizará, em quaisquer circunstâncias, a função objetivo z_1 e, em resultado, será sempre uma solução não dominada, como já havia sido mencionado anteriormente;
- Permite aproveitar ao máximo os benefícios que o efeito de aprendizagem pode promover nas funções objetivo z_2 e z_3 , já que uma mesma atividade será sempre executada por uma única equipa ao longo dos vários projetos, proporcionando um bom ponto de partida para averiguar o interesse de se introduzirem equipas adicionais.

Assim, partindo dessa origem, agora o objetivo centra-se em descobrir alguns critérios que poderão indiciar quais as atividades, em detrimento de outras, em que existe maior interesse em se adicionarem equipas na sua execução, permitindo, desta forma, guiar a tarefa de explorar o espaço da região admissível do problema. À exceção da primeira heurística que será proposta, todas as restantes irão proceder no sentido de realizarem apenas aumentos unitários ao número de equipas a executarem as atividades, de modo a não se desperdiçarem soluções intermédias que possam ser eficientes. Por analogia, poderão ser feitos movimentos que prejudiquem, para além de z_1 , as funções objetivo do problema, possibilitando a análise de soluções intermédias que possam, posteriormente, convergir para soluções não

dominadas que estejam na sua vizinhança. Isto permite, ainda, impedir que o procedimento fique retido em soluções que são apenas não dominadas localmente.

Devido ao facto de ser dada prioridade, no aumento do seu número de equipas, a determinadas atividades que apresentem melhores valores em critérios específicos, as heurísticas que nesta secção serão desenvolvidas podem enquadrar-se, com as devidas adaptações, numa classe de heurísticas designada por *regras de prioridade* ou *métodos X-pass* (Kolisch & Hartmann, 1999; Kolisch & Hartmann, 2005).

Em Kolisch & Hartmann (1999) podemos observar a seguinte definição de regra de prioridade, adaptada para traduzir fielmente o novo tipo de problema em que esta dissertação incide:

Definição 10 (Regra de prioridade) *Uma regra de prioridade é um critério que atribui um determinado valor a cada atividade i e propõe um objetivo que indica se é a atividade com valor mínimo ou máximo que é selecionada. Em caso de empate, uma ou mais do que uma regra de desempate pode ser utilizada.*

As heurísticas, que têm por base regras de prioridade (RP), incluem métodos de passagem única e múltiplos (Kolisch & Hartmann, 2000). Respetivamente, os primeiros dão prioridade a uma determinada atividade que otimiza um único valor em particular. Pelo contrário, os métodos de passagem múltipla envolvem a utilização de várias RP, em que se aplica mais do que uma RP sucessivamente, e os *métodos de amostragem* que, de modo geral, fazem uso de uma única RP, combinando-a com um certo grau de aleatoriedade (Kolisch & Hartmann, 2000).

As RP podem ainda ser classificadas tendo em atenção a fonte de informação que utilizam, por exemplo, se esta advém somente das atividades, dos projetos ou dos recursos (Kolisch, 1996a). Existem também RP que, na sua aplicação, combinam informações dos três tipos mencionados anteriormente (Kolisch & Hartmann, 2000). Entre outras formas adicionais de classificação que podem ser consultadas em Kolisch & Hartmann (1999), uma que particularmente se torna relevante faz a distinção entre RP estáticas e dinâmicas, incidindo sobre o facto de o valor atribuído pelas RP às diversas atividades poder ser fixo ou dinâmico, caso estes valores se alterem à medida que se aplica a respetiva RP.

Nas heurísticas que serão apresentadas nesta dissertação, importa especialmente referir que as mesmas, de um modo geral, retiram o conteúdo de que necessitam para serem aplicadas tanto ao nível da informação proporcionada pelos projetos como, sobretudo, das

atividades. Adicionalmente, excetuando-se a primeira heurística que será proposta, todas as restantes são de carácter dinâmico.

Apesar de direcionado para o problema de programação de multi-projetos com restrição de recursos (RCMPSP), Browning & Yassine (2010) argumentam que as heurísticas tendo por base RP são cruciais pelas seguintes razões:

- O desempenho superior que a utilização de meta-heurísticas permite obter implica um elevado esforço computacional, significando isso que as RP são necessárias para problemas de muito grande dimensão (Kolisch, 1996a);
- As RP são uma componente de outras heurísticas que assentam em pesquisa local e amostragem aleatória (Kolisch, 1996b) e são necessárias para a determinação de soluções iniciais para as meta-heurísticas (Kolisch & Hartmann, 2000);
- As RP são amplamente utilizadas nos *softwares* comerciais de gestão de projetos devido à sua rapidez e simplicidade (Herroelen, 2005).

Para além destas, tal como os autores afirmam, “talvez o principal motivo para a utilização de RP será porque, verdadeiramente, elas são muito importantes na prática”. De facto, quando os gestores de projetos na vida real se deparam com a premência de se tomarem decisões, frequentemente fazem-no de uma forma rápida e pouco ponderada, atendendo à sua intuição ou a simples princípios básicos (Browning & Yassine, 2010).

A título de curiosidade, visto que o problema em que incidiram é significativamente distinto, no contexto da gestão de multi-projetos, Browning & Yassine (2010) analisaram profundamente 20 RP diferentes e de típica utilização, muitas delas nos *softwares* de gestão de projetos mencionados acima. Como neste novo problema, que está a ser estudado nesta dissertação, se assume que os recursos estão sempre disponíveis quando são necessários, a maior parte das RP que os autores anteriores investigaram não faz qualquer sentido para este contexto. No entanto, algumas RP que poderiam ter algum fundamento nesta dissertação exploram aspetos como: dar prioridade às atividades com menor ou maior duração; privilegiar as atividades que possuem um valor superior ou inferior de folga; aleatoriedade na seleção de atividades; dar primazia às atividades com maior número de sucessores ou sucessores críticos, entre outras.

Contudo, é de reiterar que, dada a natureza deste novo problema, nenhuma destas últimas RP poderia ser agora utilizada do mesmo modo que na resolução do RCMPSP.

Tendo presente o porquê de todas as heurísticas que ir-se-ão desenvolver iniciarem o seu procedimento numa solução inicial específica, referida no início desta secção, é conveniente agora explicar alguns princípios adicionais que sustentarão a lógica subjacente à aplicação das mesmas, procurando dar resposta aos desafios de gestão que este novo problema implica.

Em primeiro lugar, importa dizer que, para que estas heurísticas possam ser aplicadas, é necessário estruturar, através do CPM, a rede dinâmica que integra a realização de todos os N projetos repetitivos que se pretendem efetuar, que se modifica consoante o vetor do número de equipas utilizado (e.g., ver as Figuras 10 e 11).

Em segundo lugar, convém referir que, de modo geral, as informações referentes à execução do primeiro projeto repetitivo não serão tidas em consideração. Tal sucede porque essa execução, no contexto do novo problema, pode ser interpretada como algo constante, dado que:

- O efeito de aprendizagem, a existir, só exerce o seu impacto positivo nos projetos $j = 2, \dots, N$;
- Um aumento do número de equipas a executar uma determinada atividade i , de igual modo, só poderá produzir efeitos nos projetos $j = 2, \dots, N$, isto porque no primeiro projeto as atividades nunca possuem a restrição (9) do modelo e, como tal, podem ser executadas assim que as atividades imediatamente anteriores que as precedem estejam finalizadas.

Em resultado do exposto, quaisquer alterações no vetor do número de equipas nunca produzirão efeitos sobre a execução do primeiro projeto repetitivo da rede, logo este não traduz nenhuma informação relevante para a decisão em se inserirem, ou não, equipas adicionais na realização das diversas atividades.

Paralelamente, de uma forma ou de outra, todas as heurísticas que aqui se irão propor assentam, sobretudo, no conceito de folga total das atividades (atraso máximo que uma atividade pode ter sem comprometer a duração mínima do projeto), que a aplicação do CPM permite obter. Ora, isto acontece pois esse parâmetro revela-se particularmente útil para procurar resolver apropriadamente o *trade-off* estratégico enunciado na secção 2.1 – Parte II.

Neste sentido, quando uma atividade possui um valor de folga maior do que zero, isso indica-nos que a mesma pode ser atrasada certo número de unidades temporais, sem

comprometer a duração mínima do projeto. Daqui se poderá deduzir que essas mesmas atividades não estão a ser responsáveis por eventuais atrasos ou antecipações que a utilização de um dado vetor de número de equipas esteja a refletir.

Repare-se também que inserir equipas adicionais, numa dada solução, apenas poderá contribuir para que se obtenham soluções não dominadas caso isso permita acelerar a realização de pelo menos um projeto, o que poderá resultar numa diminuição do atraso/atraso máximo (ou aumento da antecipação) e, por essa via, talvez também beneficiar os custos totais da solução.

Assim sendo, introduzir mais equipas na execução deste tipo de atividades (com folga > 0 em todos os projetos $j = 2, \dots, N$) apenas poderá provocar um aumento nos valores das folgas das respetivas atividades, algo que não é, do ponto de vista da gestão de projetos, interessante. Pior do que isso, será o cenário em que as atividades não críticas até se podem transformar em críticas mas pelo sentido negativo, dado que ao perderem o benefício da aprendizagem de que estavam a usufruir, podem agora estar a condicionar a duração mínima do projeto. Tal pode acontecer caso o benefício de se eliminar a restrição (9) do modelo seja totalmente anulado e superado pelo impacto negativo a que a perda da aprendizagem conduz.

Transpondo isto para o espaço dos objetivos do nosso problema, preconizar um aumento do número de equipas a efetuarem atividades não críticas pode agravar, conjuntamente, e em certas circunstâncias, as três funções objetivo do problema. Uma coisa é certa, nunca melhorará nenhuma das funções objetivo.

Neste seguimento, dado que a duração mínima dos projetos depende das atividades com folga igual a zero e a sucessão das mesmas é que dá origem a um ou mais do que um caminho crítico, interessam-nos desde logo, na decisão de aumentar o seu número de equipas, apenas as atividades que sejam críticas em pelo menos um dos projetos $j = 2, \dots, N$.

Contudo, dificultando ainda mais a exigência do problema, nem todas as atividades críticas nos poderão, efetivamente, interessar. Para entender melhor este fenómeno, poderá ver-se, mais à frente na secção 2.4, um bom exemplo ilustrativo disso mesmo na Figura 16. É exatamente por este motivo que, nesta dissertação, será proposta uma última heurística de modo a identificar, mais adequadamente, as atividades que verdadeiramente nos podem ser úteis.

Atendendo a todos estes fatores, acrescidos da componente estratégica enunciada em 2.1 – Parte II, é relativamente evidente o quão desafiante poderá ser procurar resolver este

novo problema de gestão de uma forma eficiente. Este desafio torna-se ainda mais notório, dado que até ao momento nada foi proposto no sentido de o solucionar.

Pelo motivo de se irem desenvolver procedimentos heurísticos dinâmicos que partem duma solução inicial correspondente a m equipas, importa referir que, tipicamente, esta solução poderá posicionar-se sob a forma de um dos cenários possíveis que a Figura 13 demonstra. De facto, relativamente a esta solução inicial não existem certezas quanto à localização da mesma, do ponto de vista dos custos totais (z_3), em relação a outras eventuais soluções não dominadas³. Assim, tal solução pode estar associada a uma maximização (1) (e.g., a FP da Figura 12), minimização (3) ou mesmo um ponto intermédio de custos totais (2).

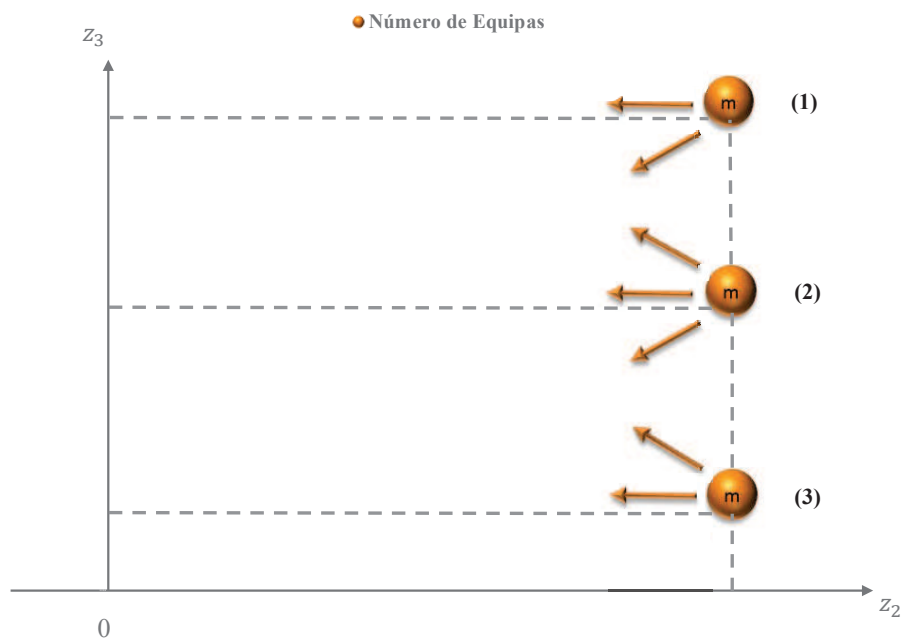


Figura 13 – Possíveis posicionamentos da solução correspondente à utilização de m equipas.

Evidentemente, tal posição dependerá, em particular, dos parâmetros custo variável e bónus/penalização. Adicionalmente, as setas da figura acima representam os movimentos desejáveis (em z_2) que, de modo geral, podem ser esperados pelo facto de se introduzirem adequadamente equipas adicionais em determinadas atividades. Dito por outras palavras, tal significa que por meio do acréscimo do número total de equipas pode ser possível, e é provável que isso aconteça, diminuir o atraso máximo do conjunto dos projetos. À semelhança do que foi dito anteriormente, também não se sabe se isso se irá traduzir em

³ De referir que poderão até existir situações pontuais em que esta solução seja a única não dominada, pois aumentar o número de equipas a executar as atividades pode não conduzir forçosamente a melhoramentos em z_2 e z_3 .

custos totais superiores ou inferiores e, novamente, tal está muito associado aos parâmetros referidos. Por exemplo, no caso da Figura 12, aumentar o número de equipas permitia reduzir os custos totais de uma forma quase linear mas isso será apenas um dos muitos padrões possíveis que se podem verificar. Inclusivamente, presume-se que seja provável, em outros exemplos, observar funções côncavas e convexas que, numa primeira fase, podem contribuir para uma diminuição dos custos, dando lugar, posteriormente, a um aumento e vice-versa. Apesar de toda esta incerteza, uma coisa é garantida: só valerá a pena aumentar o número de equipas em alguma atividade caso isso beneficie, pelo menos, uma das funções objetivo z_2 e z_3 , caso contrário é preferível manter a solução que minimiza z_1 .

Iniciando a sua aplicação pela solução inicial referida, as heurísticas irão incorporar novas soluções potencialmente não dominadas que se irão juntar à primeira, à medida que vão sendo obtidas. Assim, depois irá proceder-se no sentido de filtrar todas estas soluções geradas, atendendo à definição de solução não dominada, convergindo num determinado conjunto final. Este último representará o resultado da heurística.

Neste seguimento, em primeiro lugar, serão explicadas de uma forma detalhada as diversas heurísticas, proporcionado um enquadramento adequado para que, posteriormente, se possa acompanhar a sua aplicação prática na secção 3.

2.1 Heurística 1: folgas estáticas

A primeira heurística que se irá propor nesta dissertação é a mais simples e assenta unicamente no conceito de folga das atividades, sendo que estas irão ser assumidas como fixas, utilizando, para tal, uma dada solução inicial como referência.

Pelos motivos enunciados na secção anterior, a solução inicial que será utilizada corresponde à solução em que $\sum_{i=1}^m y_i = m$. Assim, tendo por base esta última, deverão ser calculadas as folgas médias das atividades ao longo dos projetos repetitivos $j = 2, \dots, N$, através da aplicação tradicional do CPM. Agindo desta forma, excluem-se, portanto, os valores referentes ao projeto $j = 1$. De igual modo, a pertinência de o fazer também já foi explicada na secção precedente.

Pela observação dos valores das folgas médias, as várias atividades são agrupadas por ordem não decrescente da sua folga. Para tal, assumam-se os seguintes parâmetros adicionais:

- T_{pi} – Posição p , por ordem não decrescente da folga média, da atividade i (em que $p, i = 1, \dots, m$);
- y_{pi} – Número de equipas a efetuar a atividade i , que se apresenta na posição p (em que $p, i = 1, \dots, m$).

Assim, é possível ordenar as várias atividades do seguinte modo genérico:

$$T_{1i} \rightarrow T_{2i} \rightarrow T_{3i} \rightarrow \dots \rightarrow T_{pi}, p, i = 1, \dots, m \quad (4)$$

Em que T_{1i} representa a atividade i com menor folga média, T_{2i} refere-se à atividade i com segunda menor folga média e assim sucessivamente. Com efeito, em caso de empate entre as médias das folgas das atividades, opte-se por privilegiar as atividades que possuírem maior duração inicial, isto é, maior parâmetro Di . Se hipoteticamente o empate persistir, deverá optar-se pela atividade com maior número de sucessores e, se tal não for suficiente, considere-se aleatoriamente uma ordem.

Tendo em atenção a ordem definida em (4), devem ser determinadas todas as soluções em que o número de equipas na atividade T_{1i} seja igual ou superior às de $T_{2i}, T_{3i}, \dots, T_{pi}$. De modo semelhante, nas várias soluções propostas, o número de equipas na atividade T_{2i} deverá ser sempre igual ou superior às de $T_{3i}, T_{4i}, \dots, T_{pi}$. A mesma lógica deverá ser aplicada para as atividades $T_{3i}, T_{4i}, T_{5i}, \dots, T_{pi}$. Deste modo, estar-se-á a privilegiar as atividades com

menor folga, atribuindo-lhes um número maior de equipas, em comparação com as atividades que possuem valores de folga superiores. É ainda de notar que a solução inicial referida anteriormente respeitará sempre estas condições.

Resumidamente, e de modo mais estruturado, esta primeira heurística traduz-se no seguinte procedimento:

- **Passo 1:** Determinar a solução inicial em que $\sum_{i=1}^m y_i = m$;
- **Passo 2:** Atendendo à solução definida no passo 1, calcular a folga média para todas as atividades no conjunto dos projetos $j = 2, \dots, N$;
- **Passo 3:** Ordenar as atividades por ordem não decrescente da sua folga média;
- **Passo 4:** Tendo por referência a ordem definida no passo 3, determinar todas as soluções que respeitam a condição:
$$y_{1i} \geq y_{2i} \geq y_{3i} \geq \dots \geq y_{pi}, p, i = 1, \dots, m$$
- **Passo 5:** Filtrar as soluções obtidas utilizando a definição de solução não dominada.

2.2 Heurística 2: folgas dinâmicas

À semelhança da heurística anterior, também esta incide apenas no conceito de folga das atividades. Apesar disso, a heurística 1 fixava o valor das folgas tendo em consideração a solução correspondente a m equipas e depois, tendo por base essa informação, propunham-se soluções adicionais. Já na heurística 2, começar-se-á por uma solução inicial referente a m equipas e serão inseridas equipas adicionais unitariamente, atendendo aos menores valores das folgas das atividades atualizadas e calculadas segundo um critério específico.

Assim, nesta heurística, à medida que se acrescentam novas equipas, os valores das folgas deverão ser atualizados para corresponder adequadamente à nova situação. Como tal, neste caso, não se estão a fixar os valores das folgas, mas sim a considerá-los numa perspetiva dinâmica que altera consoante o vetor do número de equipas nas diversas atividades. Relativamente ao critério utilizado para o cálculo das folgas, pelas razões já enunciadas anteriormente, não serão tidos em conta os valores do projeto 1 e, na decisão de se adicionar novas equipas, apenas se consideram como candidatas as atividades que, em pelo menos um projeto, possuam um valor de folga igual a zero. Isto porque, se tal não acontecer, é preferível usufruir dos benefícios da aprendizagem, pois, em nenhum caso, inserir equipas isoladamente nessa atividade irá beneficiar qualquer das funções objetivo do modelo matemático utilizado. Adicionalmente, entre as várias atividades que respeitam a condição anterior, a escolha por adicionar uma equipa a uma atividade em específico é feita determinando a média das folgas para essas atividades, no conjunto dos projetos $j = 1 + y_i, \dots, N$, com $y_i < N$. Isto determina que os valores do projeto 1 nunca serão tidos em conta e que, à medida que se vão adicionando mais equipas nas atividades, novos projetos deixam também de ser tidos em consideração, pela mesma lógica que leva a que inicialmente não se incida sobre o projeto 1. Por exemplo, se na Figura 11 a atividade A começar a ser executada por duas equipas, não fará sentido continuar a considerar no cálculo da folga média o projeto 2, visto que inserir novamente mais uma equipa nessa atividade nunca irá melhorar o projeto 2, mas sim apenas o projeto 3. Deste modo, para o cálculo da folga média apenas se iriam considerar os projetos $j = 1 + y_A, \dots, N = 1 + 2, \dots, 3$ portanto somente o projeto 3.

Com efeito, na atividade em que se verificar o menor valor da média das folgas, deve introduzir-se uma equipa adicional. Além disso, em caso de empate, em todas as atividades que deram origem a esta situação deve-se inserir isoladamente uma equipa adicional e, feito

isto, estas novas soluções servirão de semente para se incorporarem novas equipas. Finalmente, a heurística termina quando já não existirem atividades candidatas a serem o seu número de equipas aumentar ou na situação em que já se atingiu um limite máximo de equipas em todas as atividades, equivalente a $N * m$. Se ocorrerem empates, para além das últimas condições de paragem, as sementes adicionais deixam de gerar soluções, se imediatamente a seguir à última solução proposta, na própria semente, fossem convergir numa solução já determinada por uma outra semente. Também, é evidente que quando já estão a ser utilizadas N equipas numa determinada atividade, a heurística deixa de incidir sobre a mesma.

Sequencialmente, esta heurística pode ser representada pelo seguinte procedimento:

- **Passo 1:** Determinar a solução inicial em que $\sum_{i=1}^m y_i = m$;
- **Passo 2:** Calcular a média das folgas para as atividades que respeitem a condição apresentada e, na que se verificar um menor valor, introduz-se uma equipa adicional. Em caso de empate, deve ser gerada uma nova semente;
- **Passo 3:** Tendo por base todas as soluções obtidas no passo 2, em cada uma recalculam-se os valores das folgas médias para as atividades e acrescenta-se novamente mais uma equipa, seguindo o mesmo critério;
- **Passo 4:** Repetir os passos 2 e 3 até já não existirem atividades candidatas para se incorporarem novas equipas (1), atingir-se a solução correspondente a $\sum_{i=1}^m y_i = N * m$ (2) ou as novas sementes começarem a gerar soluções já identificadas em outras sementes (3);
- **Passo 5:** Filtrar as soluções obtidas utilizando a definição de solução não dominada.

2.3 Heurística 3: duração inicial, folgas dinâmicas e aprendizagem

A heurística 3 parte exatamente do mesmo raciocínio que foi apresentado para a heurística anterior mas, adicionalmente, procura captar a informação complementar contida pelos parâmetros duração inicial e taxa de aprendizagem das várias atividades. Assim, os seguintes aspetos, já explicados anteriormente e referentes à metodologia da heurística 2, irão também ser aplicados nesta heurística, a saber:

1. Mesma solução inicial;
2. Aumentos unitários no número de equipas nas atividades;
3. Relativamente às folgas das atividades, continua a considerar-se:
 - Que as mesmas são dinâmicas;
 - Ignoram-se os valores do projeto 1;
 - Apenas são candidatas a verem o seu número de equipas aumentar as atividades que em pelo menos um projeto sejam críticas, mantendo-se também a forma de cálculo da folga média;
4. Todas as três condições de paragem mantêm-se válidas, apesar de nesta heurística existir uma modificação no critério que determina a existência, ou não, de um empate entre as atividades candidatas.

Tendo tudo isto presente, é ainda necessário considerar os seguintes parâmetros adicionais:

- F_i – Valor da folga média da atividade i no conjunto dos projetos j ($j = 1 + y_i, \dots, N$, com $y_i < N$) (igual ao método de cálculo da folga média considerada na heurística 2);
- P_{ti} – Perda de parte do benefício da aprendizagem na atividade i com t equipas na sua execução, pelo facto de se aumentar o número de equipas para $t + 1$, em que $t = 1, \dots, N - 1$;
- W_{ti} – Coeficiente da heurística 3 para a atividade i com t equipas na sua execução, em que $t = 1, \dots, N - 1$;
- d_{ijt} – Duração da atividade i no projeto j , com t equipas na sua execução.

Nesta heurística, caso as atividades respeitem a condição apresentada e sejam, portanto, candidatas a um aumento do seu número de equipas, é escolhida a atividade i que apresentar maior coeficiente W_{ti} , que pode ser calculado pela equação seguinte:

$$W_{ti} = D_i - F_i - P_{ti} \quad (5)$$

O parâmetro P_{ti} representa, portanto, o aumento no tempo cumulativo necessário para realizar uma determinada atividade i ao longo de todos os projetos, pelo facto de se aumentar em uma unidade o número de equipas na sua execução. Deste modo, perde-se parte da redução na duração que a aprendizagem permite e, como tal, o somatório de todas as durações da atividade i nos vários projetos irá aumentar. Genericamente, este parâmetro pode ser determinado da seguinte forma:

$$P_{ti} = \sum_{j=1}^N d_{ijt+1} - \sum_{j=1}^N d_{ijt}, i = 1, \dots, m, t = 1, \dots, N - 1 \quad (6)$$

Intuitivamente, por exemplo, para os parâmetros da atividade A do Exemplo 1, caso esta atividade seja efetuada sempre por uma mesma equipa, irá ser necessária, cumulativamente, a seguinte duração: $\sum_{j=1}^N d_{Aj1} = 2 + 1,8 + 1,7 = 5,5$. Na hipótese de a mesma atividade passar a ser executada por duas equipas, então obtém-se: $\sum_{j=1}^N d_{Aj2} = 2 + 2 + 1,8 = 5,8$. Como resultado, a desvantagem que existe, em termos de aprendizagem, em aumentar o número de equipas em A para dois, corresponde a $5,8 - 5,5 = 0,3$ e traduz-se, neste caso, no parâmetro P_{ti} (6). Evidentemente, este último valor altera consoante o número de equipas que se encontram a efetuar a atividade.

Assim, no coeficiente W_{it} apresentado em (5), será dada prioridade, no aumento do seu número de equipas, às atividades com maior duração inicial, com menor folga média e onde a aprendizagem resulte em ganhos inferiores. Como estes três fatores encontram-se na mesma unidade temporal, é possível conjugá-los desta maneira simples. Desta forma, para que o valor do coeficiente aumente, contribui positivamente a duração inicial e negativamente a folga média e os benefícios da aprendizagem.

De facto, tal faz sentido, isto porque, de modo geral, pode ser sensato procurar acelerar as atividades com maior duração inicial, colocando mais equipas na sua execução, o que pode ser vantajoso na redução do tempo de conclusão dos vários projetos. Relativamente à folga média, quanto mais próxima esta estiver de zero menos deteriora o valor do coeficiente,

contribuindo para privilegiar as atividades mais críticas que, tipicamente, são as que mais usufruem do aumento unitário de equipas. Por último, como é lógico, quanto mais uma atividade beneficiar da aprendizagem, menos conveniente se torna acrescentar-lhe uma equipa e, portanto, o coeficiente apresentado tem isso em consideração.

Outra novidade em relação à heurística 2 é que nesta considera-se existir um empate entre atividades candidatas, sempre que a diferença que separa o maior coeficiente W_{ti} dos restantes for inferior ou igual à média das durações iniciais de todas as atividades. De facto, nesta heurística seria difícil existirem empates caso estes fossem considerados por equivalência de coeficientes. Assim, optou-se por utilizar o critério referido como medida máxima de tolerância, de modo a provocar empates que possam ser pertinentes. Contudo, para este efeito, outros critérios podem facilmente ser utilizados. Desta forma, em caso de empate, deve ser seguido exatamente o mesmo procedimento que na heurística 2 e, de igual modo, se as atividades já estiverem a ser executadas por N equipas, a heurística 3 deixa de as considerar.

Finalmente, esta heurística pode ser descrita pelo seguinte procedimento:

- **Passo 1:** Determinar a solução inicial em que $\sum_{i=1}^m y_i = m$;
- **Passo 2:** Calcular os coeficientes W_{ti} para todas as atividades que respeitem a condição apresentada e, na que se verificar um valor superior, acrescenta-se uma equipa. Adicionalmente, todos os coeficientes candidatos que estiverem a uma distância igual ou inferior à tolerância, comparativamente ao coeficiente de maior valor, devem também ver o seu número de equipas aumentado isoladamente, gerando novas sementes;
- **Passo 3:** Tendo por base todas as soluções obtidas em 2, em cada uma recalculam-se os valores dos coeficientes W_{ti} e introduz-se uma equipa adicional, seguindo o mesmo critério;
- **Passo 4:** Repetir os passos 2 e 3 até já não existirem atividades candidatas para se incorporarem novas equipas (1), atingir-se a solução correspondente a $\sum_{i=1}^m y_i = N * m$ (2) ou as novas sementes começarem a gerar soluções já identificadas em outras sementes (3);
- **Passo 5:** Filtrar as soluções obtidas utilizando a definição de solução não dominada.

2.4 Heurística 4: contributos críticos válidos

Por último, a heurística 4 incide unicamente sobre o conceito de folga das atividades, porém fá-lo de uma forma mais rigorosa e coerente do que na heurística 2, onde, resumidamente, apenas se calculava a média das folgas das atividades caso as mesmas fossem críticas em pelo menos um projeto. Por seu turno, na heurística que será apresentada nesta secção, avalia-se a suscetibilidade efetiva de uma atividade poder, de facto, contribuir positivamente para um melhoramento das soluções (ao nível de z_2 e z_3), através do aumento do seu número de equipas em uma unidade. Este efeito positivo nas funções objetivo referidas só poderá acontecer, mas tal não é garantido, se a atividade que se está a analisar for capaz de proporcionar pelo menos um *contributo crítico válido* (CCV) a uma atividade subsequente nas redes dos projetos, podendo ser inclusivamente a própria atividade mas em projetos seguintes. Se tal condição não se verificar, em quaisquer circunstâncias, nessa solução nunca valerá a pena aumentar o número de equipas a executar a atividade, pois é preferível aproveitar os ganhos inerentes à aprendizagem. Inclusivamente, na eventualidade de tal aumento erróneo ser feito, poder-se-á estar a degradar conjuntamente as três funções objetivo do problema. O que se entende exatamente por CCV será explicado mais à frente nesta secção.

Nesta fase inicial, convém mencionar que alguns dos princípios por detrás das duas heurísticas anteriores irão também ser aplicados na heurística 4, nomeadamente:

1. Mesma solução inicial;
2. Aumentos unitários no número de equipas nas atividades;
3. Relativamente às folgas das atividades, mantem-se a consideração que:
 - As mesmas são dinâmicas;
 - À exceção de uma situação particular que será explicada mais à frente, ignoram-se os valores do projeto 1;
 - Apenas são candidatas, a verem o seu número de equipas aumentar, as atividades que em pelo menos um projeto sejam críticas, apesar de nesta heurística serem ainda necessárias condições adicionais que determinam se a atividade é candidata ou não.
4. Todas as três condições de paragem mantêm-se válidas.

De modo a perceber-se melhor em que consiste esta heurística, devem assumir-se os seguintes parâmetros adicionais:

- F_{ij} – Folga da atividade i no projeto j , em que $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, N$ com $F_{ij} \geq 0$;
- $F_{i'j'}$ – Folga da atividade i' , onde i' é uma atividade subsequente à atividade i , no projeto j' ($j' = j, \dots, N$) e $F_{i'j'} \geq 0$ (em que se $j = j'$ então $i \neq i'$ e se $i = i'$ então $j \neq j'$);
- FMC_{ij} – Fim mais cedo da atividade i no projeto j (obtido através do CPM);
- $IMC_{i'j'}$ – Início mais cedo da atividade subsequente i' no projeto j' ;
- CCV_i – Número de contributos críticos válidos da atividade i .

Neste momento, já é possível definir o que se entender por um CCV, a saber:

Definição 11 (Contributo crítico válido) *Considera-se que uma determinada atividade i no projeto j pode dar um CCV a uma outra atividade subsequente i' (podendo ser até à própria atividade mas num projeto seguinte) no projeto j' , sempre que F_{ij} e $F_{i'j'}$ sejam iguais a zero e se os parâmetros FMC_{ij} e $IMC_{i'j'}$ apresentarem exatamente o mesmo valor.*

Matematicamente, de um modo geral, existe um CCV entre uma atividade i e uma outra atividade subsequente i' sempre que a seguinte equação se verificar entre ambas:

$$F_{ij} + F_{i'j'} + IMC_{i'j'} - FMC_{ij} = 0 \quad (7)$$

Desta equação, e de modo a que a mesma seja assimilada de uma forma mais intuitiva, resultam as seguintes observações relevantes:

1. Se F_{ij} e $F_{i'j'}$ forem ambas maiores que zero, a equação nunca terá o valor de zero, dado que $IMC_{i'j'}$ é sempre igual ou maior que FMC_{ij} . Neste caso, nem a atividade i nem a atividade i' são críticas e, portanto, i não é capaz de fornecer um CCV a i' ;
2. No caso de F_{ij} ser igual a zero mas $F_{i'j'}$ ser superior a zero, a atividade i é crítica mas não por causa da relação que tem com a atividade i' e, como tal, i não consegue proporcionar um CCV a i' , e vice-versa caso $F_{i'j'}$ seja igual a zero e F_{ij} superior a zero. Novamente, a equação (7) não se verificará;
3. Na situação de F_{ij} e $F_{i'j'}$ serem ambas iguais a zero mas verificar-se que $IMC_{i'j'} \neq FMC_{ij}$, então ambas as atividades são críticas mas devido ao relacionamento que estabelecem com outras atividades da rede e não entre si. Desta forma, a atividade i não se encontra apta a conferir um CCV a i' e, como $IMC_{i'j'} \geq FMC_{ij}$, logo a equação não se irá comprovar;

4. Por último, existe a situação desejável em que F_{ij} e $F_{i'j'}$ são ambas iguais a zero e constata-se que $IMC_{i'j'} = FMC_{ij}$. Assim sendo, a equação referida apresentará o valor de zero e verifica-se que a atividade i poderá proporcionar um CCV a i' . De facto, neste caso, acelerar a execução da atividade i pode permitir influenciar positivamente o intervalo temporal em que atividade i' é efetuada.

Assim, para o interesse desta heurística, devem ser contados em cada solução todos os CCVs que cada atividade tem capacidade de proporcionar a outras atividades subsequentes, sendo que serão privilegiadas, no aumento do seu número de equipas, as atividades que apresentarem maior apetência para gerarem CCVs.

Na aplicação da equação anterior, existem duas alterações que devem ser tidas em conta para uma adequada contagem do número de CCVs, que são as seguintes:

1. Se uma atividade i no projeto j puder dar um CCV para ela própria, ou seja $i = i'$, mas num projeto subsequente j' , então o número de CCVs da atividade i deve ser calculado tendo em conta os próprios CCVs que a atividade i' estabelece com atividades subsequentes;
2. Para as atividades que não possuem sucessores a não ser elas mesmas mas em projetos subsequentes (e.g., E e F na rede do Exemplo 1) e no caso de não estarem a ser efetuadas por N equipas, a contagem de CCVs nos projetos $j \neq 1$ terá de ter em consideração o valor de FMC_{i1} para se determinar se existe algum interesse em aumentar o número de equipas nessa atividade. Este constitui o único caso em que os valores do projeto 1 serão tidos em consideração por esta heurística.

Para se perceber melhor o conceito de CCV e ambas estas alterações, de seguida irei apresentar duas situações ilustrativas tendo por base a rede e os parâmetros do Exemplo 1.

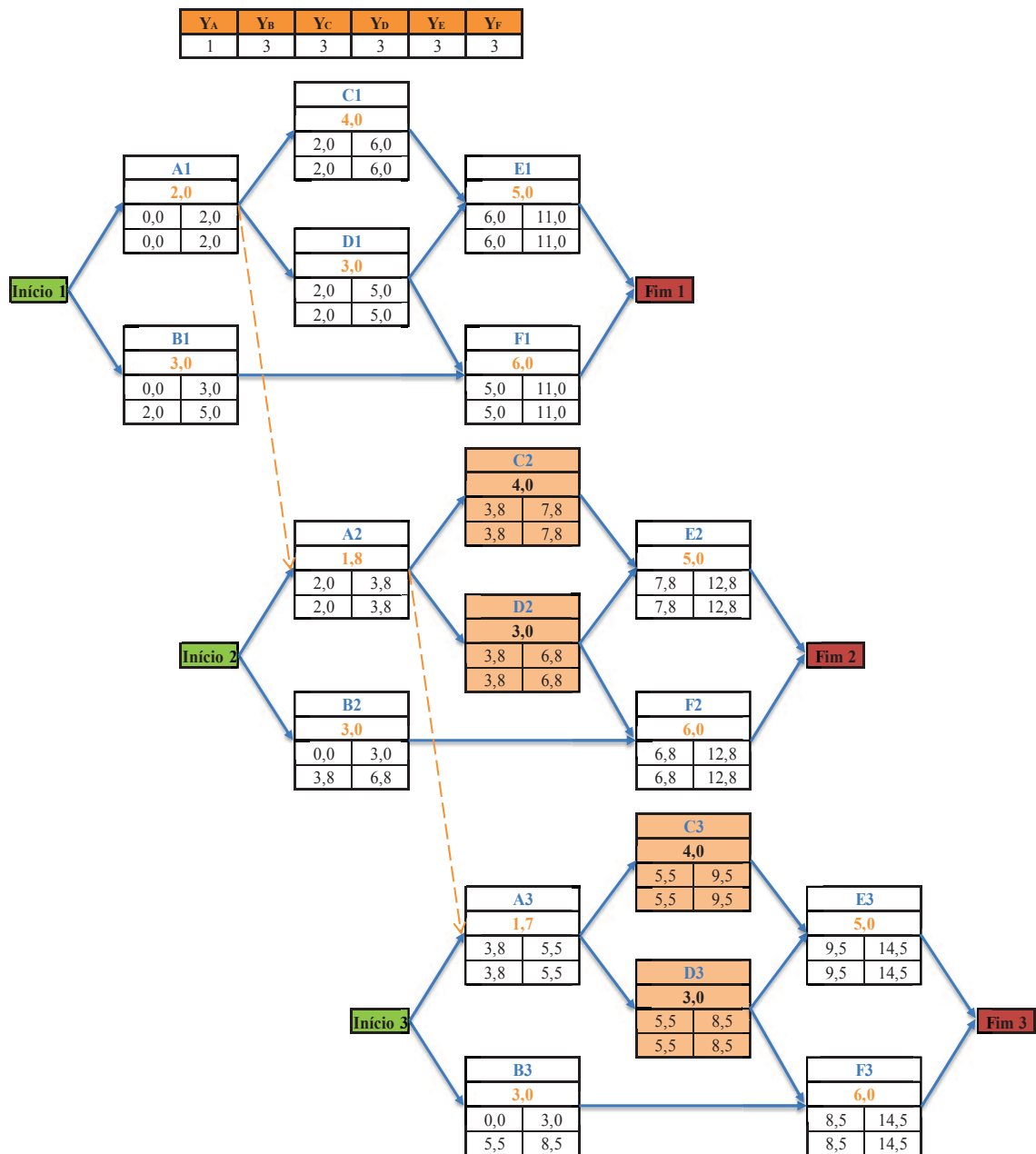


Figura 14 – Exemplo 1 da aplicação da heurística 4.

Neste caso, como a atividade A está apenas a ser efetuada por uma equipa, acrescentar-lhe uma equipa poderá conduzir a uma maior rapidez na execução de A2, que se reflete em A3, que, por sua vez, poderá permitir reduzir os tempos de execução dos projetos 2 e 3. Assim, relativamente ao projeto 2, como o relacionamento de A2 com C2 e D2 respeita a equação de CCV, então tal significa que A2 pode aqui proporcionar um total de dois CCVs, um a C2 e outro a D2, respetivamente. Quanto ao projeto 3, e mantendo a análise à atividade A2, esta pode conceder um CCV à atividade A3 que depois se irá refletir em CCVs com C3 e D3. Porém, na quantificação do total de CCVs que a atividade A2 proporciona no projeto 3, apenas se irão considerar as atividades C3 e D3, por intermédio de A3. Assim, nesta situação, a atividade A pode propiciar um total de quatro CCVs, nas atividades referidas e destacadas na figura acima.

Se também se considerasse A3, estar-se-ia a acrescentar indevidamente um CCV na atividade A2 e a penalizar as atividades que não possuem sucessores. Isto porque, esquecendo o exemplo anterior e imaginando um caso em que A2, por intermédio de A3, apenas conseguia proporcionar um CCV a C3, então seriam atribuídos a A2 dois CCVs. Ao mesmo tempo, se a relação entre E2 e E3 respeitasse a condição de CCV, então considerava-se que E2 tinha capacidade de fornecer apenas um CCV. Assim, na prática, ir-se-ia beneficiar erradamente A2 em detrimento de E2 quando na verdade ambas possuiriam apenas um CCV. Tal explica-se pelo facto de A3 só respeitar a condição de CCV por causa de C3 e, portanto, tendo como perspetiva a atividade A2, apenas C3 deve interessar como CCV.

No que se refere à segunda alteração referida anteriormente, observe-se a seguinte rede integrada:

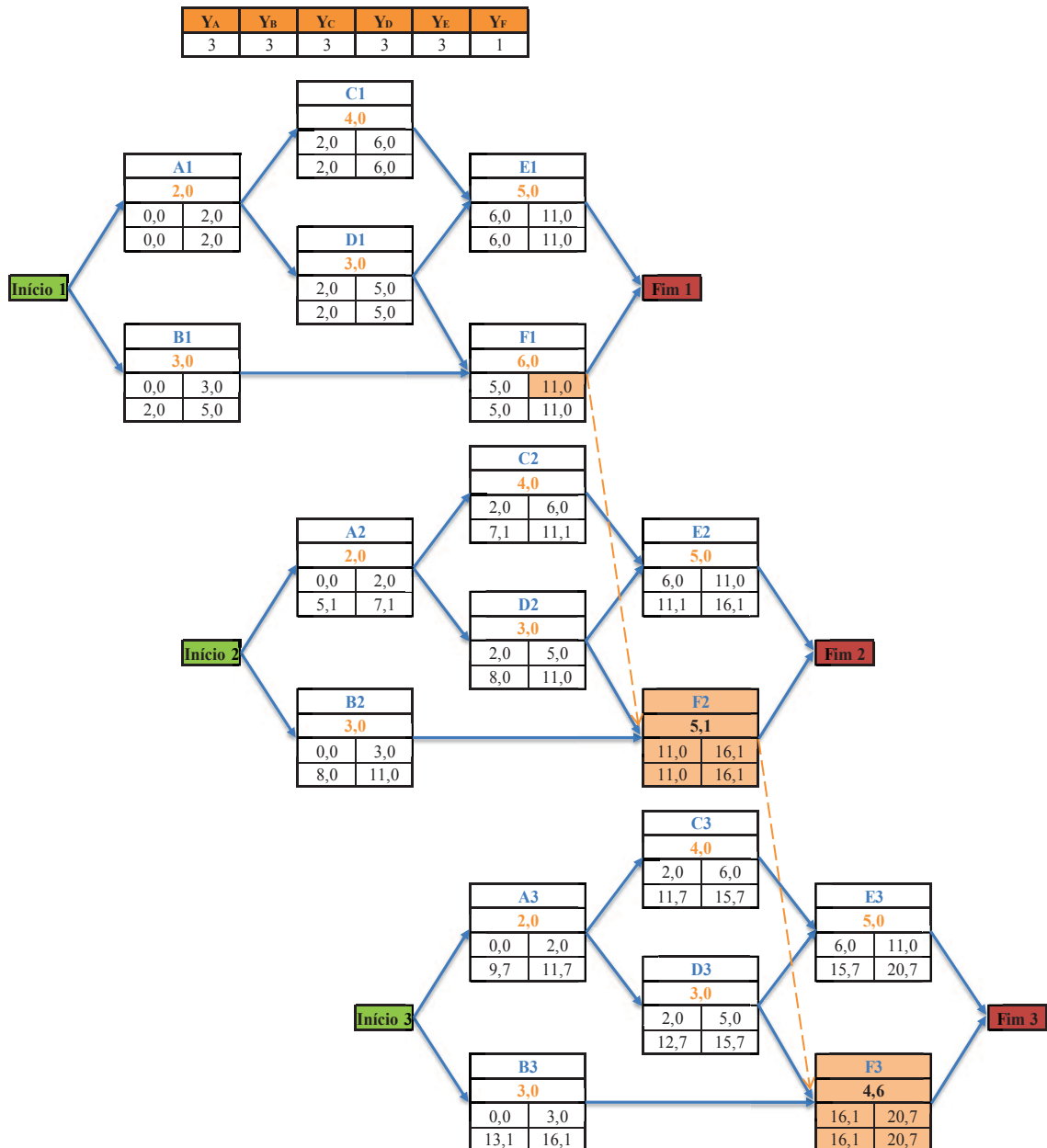


Figura 15 - Exemplo 2 da aplicação da heurística 4.

Nesta situação, pelas mesmas razões do exemplo da Figura 14, aumentar uma equipa na execução da atividade F pode contribuir para reduzir os tempos de execução dos projetos 2 e 3. Assim, como a atividade F não tem sucessores a não ser a própria atividade em projetos subsequentes, existe a necessidade de se entrar em linha de conta com o FMC_{F1} na quantificação do número total de CCVs que a atividade F pode proporcionar. Desta maneira, observando a Figura 15, vê-se que os relacionamentos entre F1-F2 e F2-F3 respeitam a equação de CCV e, como tal, considera-se que o aumento de uma equipa na atividade F pode gerar dois CCVs.

De facto, nesta heurística a única circunstância que leva a ter de se observar os valores do projeto 1 é na avaliação do número de CCVs que as atividades que não têm sucessores, na rede dos projetos, podem proporcionar a elas próprias. O exemplo anterior foi ilustrativo disso mesmo. Isto acontece porque não tendo atividades sucessoras, é impossível avaliá-las tal como foi feito para a atividade A na Figura 14.

Exposto tudo isto acerca desta heurística, é perfeitamente visível a novidade e o contributo valioso que a mesma consegue proporcionar, em comparação com as heurísticas anteriores. Assim, a principal vantagem desta heurística é que, através da equação de CCV (7), permite identificar claramente, do ponto de vista das durações mínimas, as atividades que efetivamente dependem umas das outras e, com efeito, as que teoricamente mais podem contribuir para melhorar as funções objetivo z_2 e z_3 . Neste sentido, repare-se na figura seguinte que representa uma outra rede de projetos:

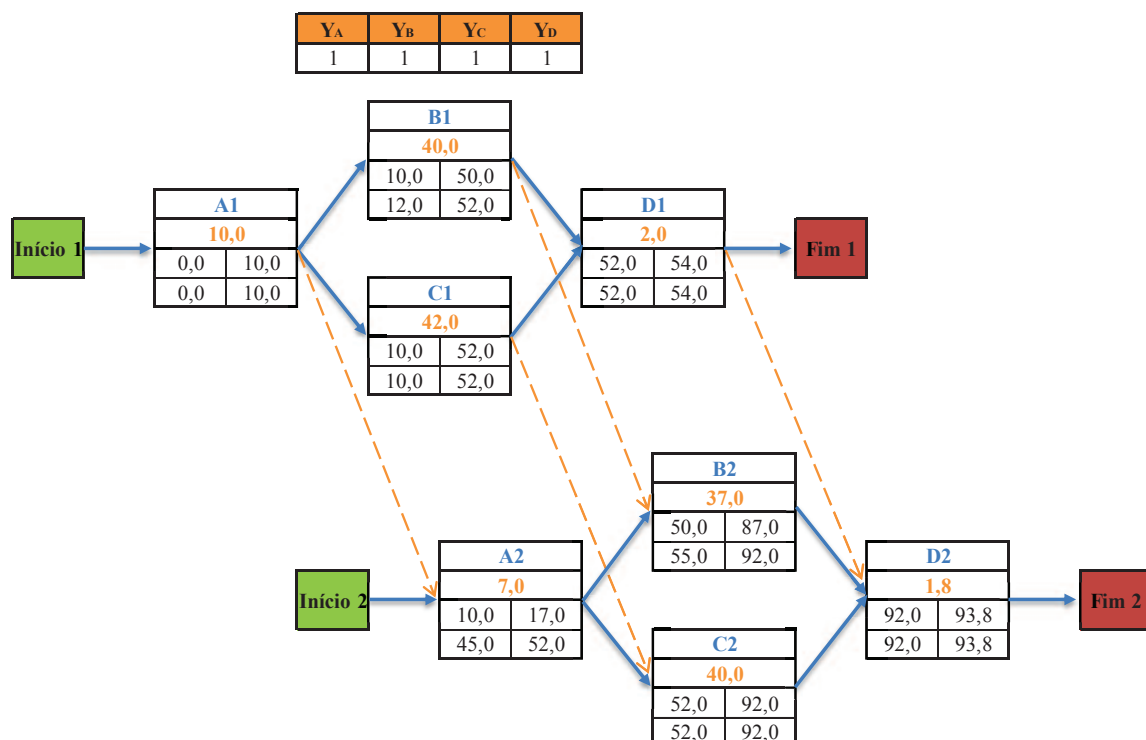


Figura 16 – Exemplo 3 da aplicação da heurística 4.

Neste exemplo meramente ilustrativo, as heurísticas 2 e 3 iriam considerar que existia um potencial interesse em aumentar o número de equipas a executar a atividade D, pelo facto de esta ser crítica no projeto 2. Contudo, isso seria um erro grave, pois o que de verdade se verifica é que a atividade D2 é crítica por causa de C2 e não de D1. O interesse real estaria, então, em adicionar uma equipa na atividade C.

A heurística 4 previne esta situação e contribui para uma melhor tomada de decisão, visto que aplicando a equação sugerida anteriormente, verifica-se que a atividade C possui um CCV enquanto que a atividade D nenhum. Deste modo, e recuperando o que foi dito no início desta secção, adicionar uma equipa na execução da atividade D, que não confere nenhum CCV, poderia ter consequências negativas em todas as três funções objetivo do problema. Detalhadamente, isto sucede em z_3 , porque perdendo o benefício da aprendizagem, os custos variáveis iram aumentar e também os de bónus/penalização, dado que se iria assistir a um aumento na duração da atividade D no projeto 2, em 0,2 (2-1,8), o que, consequentemente, se iria traduzir no aumento da duração do projeto 2 para 94. Devido a este último, caso o atraso máximo (z_2) dependesse do projeto 2, também facilmente se compreende o porquê de esta função objetivo poder aumentar em 0,2. É ainda evidente que a função objetivo z_1 seria sempre prejudicada por se adicionar mais uma equipa.

Tendo isto em consideração, um aumento do número de equipas em atividades que não têm a capacidade de gerar quaisquer CCVs irá sempre prejudicar as funções objetivo do número total de equipas e custo total, ao mesmo tempo que não beneficia em nada o atraso máximo, podendo mesmo, em certas circunstâncias específicas, agravá-lo. Daqui se compreende a importância da heurística 4 que identifica, em todas as soluções, estas atividades com consequências gravosas e nunca as considera como candidatas a verem o seu número de equipas aumentar. É por esta razão que nesta heurística não se consideram sucessores críticos das atividades, mas sim contributos críticos **válidos**.

Por analogia, o exemplo da Figura 16 é ainda ilustrativo do fenómeno de a aprendizagem poder, num cenário favorável, conjuntamente contribuir positivamente para todas as três funções objetivo, no caso de se alterar, de duas para uma, o número de equipas a executar a atividade D.

Importa, ainda, referir que a principal razão pela qual aumentar o número de equipas, em atividades que têm a capacidade de proporcionar CCVs, nem sempre melhorará as funções objetivo z_2 e z_3 , isto porque o benefício que se obtém em se deixar de ter as

restrições de precedência (9), entre as próprias atividades em relação às suas execuções anteriores, pode não compensar a perda em que se incorre por se estar a abdicar de parte do efeito de aprendizagem.

Na aplicação prática desta heurística, é dada prioridade no aumento unitário do número de equipas, às atividades que apresentarem maior número de CCVs, sendo que, por cada um destes que se verificar, atribuir-se-á o valor de 1. Em caso de empate entre as atividades, deverá ser seguido o mesmo procedimento da heurística 2. Apesar disso, poderiam ser utilizados outros critérios que determinam a existência de empates, tal como foi demonstrado na heurística 3, de modo a aumentar a eficácia da heurística. Pelas razões já enunciadas, evidentemente que as atividades que não possuírem quaisquer CCVs não serão consideradas como candidatas e, portanto, apresentarão o valor de zero na sua respetiva célula. Seguindo a mesma lógica das heurísticas anteriores, a quantificação do número de CCVs da atividade i é feita apenas nos projetos $j = 1 + y_i, \dots, N$, com $y_i < N$, terminando a heurística de incidir sobre as atividades assim que estas já verificarem N equipas na sua execução.

De forma sucinta, o procedimento estruturado desta heurística encontra-se descrito abaixo:

- **Passo 1:** Determinar a solução inicial em que $\sum_{i=1}^m y_i = m$;
- **Passo 2:** Calcular o número de CCVs que cada atividade consegue proporcionar, tendo por base a equação (7) apresentada e as respetivas alterações necessárias à mesma para uma adequada quantificação. Entre as atividades candidatas ($CCV_i > 0$), na que apresentar um maior valor de CCVs, deve ser inserida uma equipa adicional na sua execução. Em caso de empate, todas as atividades que deram origem a essa situação devem ver o seu número de equipas aumentado isoladamente, gerando respetivamente novas sementes;
- **Passo 3:** Atendendo a todas as soluções obtidas no passo 2, em cada uma recalculam-se os valores de CCVs de cada atividade e introduz-se uma equipa adicional, seguindo o mesmo critério;
- **Passo 4:** Repetir os passos 2 e 3 até já não existirem atividades candidatas para se incorporarem novas equipas (1), atingir-se a solução correspondente a $\sum_{i=1}^m y_i = N * m$ (2) ou as novas sementes começarem a gerar soluções já identificadas em outras sementes (3);
- **Passo 5:** Filtrar as soluções obtidas utilizando a definição de solução não dominada.

3. Aplicação das heurísticas

De modo a se entender de uma forma mais intuitiva a explicação de todas as respectivas heurísticas e compreender exatamente em que consiste a sua aplicação prática, nesta secção ir-se-á recorrer às mesmas para procurar resolver eficientemente dois exemplos diferentes, tendo por base a rede da Figura 9.

Nesta fase, isso permitirá, também, observar como se comportam as heurísticas e aferir os resultados alcançados pelas mesmas. No final de cada exemplo, serão exibidos quadros resumo que sintetizam os resultados obtidos pelas mesmas e serão acompanhados pelas principais ilações que a aplicação das heurísticas permitiu reter. Adicionalmente, sempre que tal for pertinente, os resultados serão comentados à medida que as heurísticas são utilizadas.

Devido às restrições de tempo inerentes a esta dissertação, é de notar que as heurísticas desenvolvidas anteriormente não foram ainda programadas para serem aplicadas computacionalmente e, portanto, todo o procedimento que será realizado foi feito manualmente. As heurísticas serão apenas utilizadas em exemplos simples, para ilustrar a sua potencialidade e pertinência. No entanto, futuramente, pretender-se-á implementá-las computacionalmente e testar a sua adequação em problemas maiores, mais complexos e representativos.

3.1 Exemplo 1

Neste t3pico, ir-se-3o aplicar as v3rias heur3sticas 3 rede e aos par3metros do Exemplo ilustrativo 1 da sec3o 2.2.1 – Parte II.

3.1.1 Heur3stica 1

Proceda-se ent3o 3 aplica3o da heur3stica 1 3 rede e aos par3metros do Exemplo 1. Neste caso, a solu3o inicial que se segue apresenta, 3 direita, os seguintes valores para a m3dia da folga das v3rias atividades nos projetos $j = 2, 3$:

Sol. N3	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	A	B	C	D	E	F
1*	1	1	1	1	1	1	7,0	7,1	4,4	5,6	2,1	0,0

Ordenando as atividades de forma crescente pelo valor das suas folgas m3dias, obt3m-se o seguinte: $T_{1F} \rightarrow T_{2E} \rightarrow T_{3C} \rightarrow T_{4D} \rightarrow T_{5A} \rightarrow T_{6B}$.

Tendo por base esta ordem, de seguida ser3o determinadas todas as solu33es que respeitam a condi3o definida no passo 4, para al3m da solu3o N31* j3 identificada.

Sol. N3	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F
2*	1	1	1	1	1	2
3*	1	1	1	1	2	2
4*	1	1	2	1	2	2
5	1	1	2	2	2	2
6*	2	1	2	2	2	2
7	2	2	2	2	2	2
8	2	2	2	2	2	3
9	2	2	2	2	3	3
10*	2	2	3	2	3	3
11*	2	2	3	3	3	3
12*	3	2	3	3	3	3
13*	3	3	3	3	3	3
14	1	1	1	1	1	3
15	1	1	1	1	3	3
16	1	1	3	1	3	3
17	1	1	3	3	3	3
18	3	1	3	3	3	3
19*	1	1	1	1	2	3
20	1	1	2	1	3	3
21	1	1	3	2	3	3
22	2	1	3	3	3	3
23*	1	1	2	1	2	3
24*	1	1	2	2	2	3
25*	2	1	2	2	2	3
26*	1	1	2	2	3	3
27*	2	1	2	2	3	3
28*	2	1	3	2	3	3

Feito isto, o procedimento desta heurística encontra-se concluído. Tendo em conta que as soluções em que a sua numeração foi acompanhada por um asterisco representam soluções eficientes, como pode ser verificado na Tabela 7, estamos em condições de calcular as medidas de eficácia e eficiência. Assim, tem-se o seguinte:

- $\% \text{ da FP obtida} = \frac{16}{16} = 100,00\%$
- $\text{Eficiência} = \frac{16}{28} = 57,14\%$

Apesar de esta heurística ter conseguido descobrir a totalidade da FP, como veremos mais à frente, na sua aplicação seguinte, tal terá sido apenas um “golpe de sorte”.

3.1.2 Heurística 2

De modo a compreender-se melhor esta heurística e averiguar os seus resultados, de seguida a mesma irá ser aplicada ao Exemplo referido. De notar que as células com um traço irão representar as atividades não candidatas e as células fechadas significam que as atividades já atingiram o limite de N equipas na sua execução. Assim, em baixo, à esquerda será feito o acompanhamento das várias soluções propostas e à direita do respetivo cálculo das folgas médias, de acordo com o critério exposto anteriormente. Adicionalmente, será também apresentado o número total de equipas (z_1) utilizado em cada solução, de modo a facilitar a análise dos dados, e serão destacadas, das restantes, as células referentes ao menor valor da média das folgas, que determinam em que atividade devem ser adicionadas novas equipas. Tendo tudo isto presente, proceda-se então à aplicação da respetiva heurística:

Sol. N°	ZI	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	A	B	C	D	E	F
1*	6	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	0
2*	7	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	0	-
3*	8	1	1	1	1	2	2	-	-	0,1708	-	-	0
4*	9	1	1	1	1	2	3	-	-	0	-	0	

Verificando-se o primeiro empate, neste caso entre as atividades C e E, opte-se por acrescentar uma equipa em C e, quando esta primeira semente terminar, contemplar-se-á o aumento isolado em E.

Sol. N°	ZI	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	A	B	C	D	E	F
5*	10	1	1	2	1	2	3	-	-	-	0	-	
6*	11	1	1	2	2	2	3	0,5788	-	-	-	0	
7*	12	1	1	2	2	3	3	0,2538	-	0	-		
8	13	1	1	3	2	3	3	0	-		-		
9*	14	2	1	3	2	3	3	-	0		-		
10*	15	2	2	3	2	3	3	-	-		0		
11*	16	2	2	3	3	3	3	0	-				
12*	17	3	2	3	3	3	3		0				
13*	18	3	3	3	3	3	3						

Terminou devido à condição de paragem (2)

Tendo a semente original convergido numa solução com um número total de equipas igual a $N * m$, então importa agora regressar ao empate anterior entre C e E e gerar a respetiva nova semente.

Sol. N°	ZI	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	A	B	C	D	E	F
14	10	1	1	1	1	3	3	-	-	0	-		
15	11	1	1	2	1	3	3	-	-	-	0		

Terminou devido à condição de paragem (3)

Nesta semente, a próxima solução proposta coincidiria com a solução N°7 já apresentada anteriormente e, como tal, não existe interesse em determiná-la. Assim sendo, a aplicação da heurística chegou ao fim.

Neste sentido, podem agora ser calculadas as medidas de eficácia e eficiência:

- $\% \text{ da FP obtida} = \frac{12}{16} = 75,00\%$
- $\text{Eficiência} = \frac{12}{15} = 80,00\%$

3.1.3 Heurística 3

Na aplicação da heurística 3, importa referir que a simbologia das células com um traço e das células fechadas terá o mesmo significado que na heurística 2. Deste modo, à esquerda será feito o acompanhamento das várias soluções propostas e à direita do respetivo cálculo dos coeficientes W_{ti} para as diversas atividades. Por conveniência, será novamente apresentado o número total de equipas (z_1) utilizado em cada solução e serão destacadas, das restantes, as células referentes aos maiores coeficientes W_{ti} , que determinam em que atividades devem ser adicionadas novas equipas. Considerando tudo isto, proceda-se agora à sua aplicação começando pelo cálculo da tolerância:

$$\blacksquare \text{ Tolerância} = \frac{\sum_{i=A}^F D_{i1}}{6} = 3,83$$

Sol. Nº	Z1	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	W _{TA}	W _{TB}	W _{TC}	W _{TD}	W _{TE}	W _{TF}
1*	6	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	4,64
2*	7	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	3,17	-
3*	8	1	1	1	1	2	2	-	-	2,64	-	-	5,10

Verifica-se um empate entre as atividades C e F, isto porque 2,64 encontra-se dentro do limite de tolerância que, neste caso, vai até a um valor mínimo de $5,10 - 3,83 = 1,27$. Inicialmente, opte-se por inserir uma equipa em F e, quando esta primeira semente terminar, contemplar-se-á o aumento isolado em C.

Sol. Nº	Z1	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	W _{TA}	W _{TB}	W _{TC}	W _{TD}	W _{TE}	W _{TF}
4*	9	1	1	1	1	2	3	-	-	2,81	-	3,75	/

Novamente, assiste-se a um novo empate mas desta vez entre as atividades C e E. Começamos por acrescentar uma equipa em E e no fim tratar-se-á do aumento isolado em C.

Sol. Nº	Z1	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	W _{TA}	W _{TB}	W _{TC}	W _{TD}	W _{TE}	W _{TF}
5	10	1	1	1	1	3	3	-	-	2,81	-	/	/
6	11	1	1	2	1	3	3	-	-	-	1,70	/	/
7*	12	1	1	2	2	3	3	1,44	-	3,20	-	/	/

Mais uma vez, ocorre um empate entre duas atividades. Introduzir-se-á um aumento em C para mais tarde regressar ao aumento em A.

Sol. Nº	Z1	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	W _{TA}	W _{TB}	W _{TC}	W _{TD}	W _{TE}	W _{TF}
8	13	1	1	3	2	3	3	1,69	-	/	-	/	/
9*	14	2	1	3	2	3	3	-	2,11	/	-	/	/
10*	15	2	2	3	2	3	3	-	-	/	2,10	/	/
11*	16	2	2	3	3	3	3	1,80	-	/	/	/	/
12*	17	3	2	3	3	3	3	/	2,40	/	/	/	/
13*	18	3	3	3	3	3	3	/	/	/	/	/	/
Terminou devido à condição de paragem (2)													

Visto que a semente original convergiu numa solução com um número total de equipas igual a $N * m$, então é relevante agora regressar ao primeiro empate que ocorreu entre C e F, gerando a respetiva nova semente.

Sol. Nº	Z I	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	W _{IA}	W _{IB}	W _{IC}	W _{ID}	W _{IE}	W _{IF}
14*	9	1	1	2	1	2	2	-	-	-	0,61	-	5,10
15*	10	1	1	2	1	2	3	-	-	-	1,70	-	
16*	11	1	1	2	2	2	3	1,11	-	-	-	3,75	

De facto, agora iria existir novamente um empate. No entanto, se aumentássemos isoladamente uma equipa na atividade E iríamos obter a solução N°7*, logo, não existe interesse em determiná-la e não se verifica um verdadeiro empate.

Sol. Nº	Z I	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	W _{IA}	W _{IB}	W _{IC}	W _{ID}	W _{IE}	W _{IF}
17*	12	2	1	2	2	2	3	-	1,48	-	-	3,75	

Neste caso, verifica-se um empate que é indiferente ser analisado agora ou depois, isto porque aumentar uma equipa em E vai convergir na semente adicional que falta tratar, em resultado do empate número três. Opte-se, então, por primeiramente proceder a um aumento em B.

Sol. Nº	Z I	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	W _{IA}	W _{IB}	W _{IC}	W _{ID}	W _{IE}	W _{IF}
18	13	2	2	2	2	2	3	-	-	-	-	3,75	
19	14	2	2	2	2	3	3	-	-	3,20	-		
Terminou devido à condição de paragem (3)													

Esta semente terminou visto que a próxima solução sugerida coincidiria com a solução N°10* já apresentada anteriormente e, portanto, não existe interesse em explicitá-la.

Retomando ao segundo empate inicial entre as atividades C e E, se agora fossemos aumentar uma equipa em C, ir-se-ia obter uma solução igual à solução N°15*. Assim, tal não é interessante, restando apenas analisar o terceiro empate.

Sol. Nº	Z I	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	W _{IA}	W _{IB}	W _{IC}	W _{ID}	W _{IE}	W _{IF}
20*	13	2	1	2	2	3	3	-	1,76	3,20	-		
Terminou devido à condição de paragem (3)													

Nesta última semente, tanto aumentar uma equipa isoladamente em B como em C irá conduzir a soluções redundantes, pois já foram determinadas atrás, respetivamente nas soluções N°19 e N°9*. Deste modo, esta semente chegou ao seu fim.

Finalmente, tendo sido concluídas todas as sementes, a heurística 3 terminou. Com efeito, já estamos em condições de calcular ambas as medidas de avaliação:

- $\% \text{ da FP obtida} = \frac{15}{16} = 93,75\%$
- $\text{Eficiência} = \frac{15}{20} = 75,00\%$

3.1.4 Heurística 4

Em último lugar, ir-se-á efetuar a aplicação da heurística 4. Para tal, à esquerda será feito o acompanhamento das várias soluções propostas e à direita do respetivo cálculo dos CCVs para as diferentes atividades. Para uma melhor orientação, novamente será apresentado o número total de equipas (z_1) utilizado em cada solução e serão realçadas, das restantes, as células referentes aos maiores valores de CCVs, que indicam em que atividades devem ser inseridas, unitariamente, novas equipas. Adicionalmente, também as células fechadas devem ser interpretadas do mesmo modo que nas heurísticas anteriores. Tendo isto presente, avancemos agora para a sua aplicação:

Sol. N°	ZI	YA	YB	YC	YD	YE	YF	CCVA	CCVB	CCVC	CCVD	CCVE	CCVF
1*	6	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2
2*	7	1	1	1	1	1	2	0	0	0	0	2	0
3*	8	1	1	1	1	2	2	0	0	1	0	0	1

Ao fim de três soluções propostas, assiste-se a um primeiro empate entre as atividades C e F. Começamos por inserir uma equipa em C e mais tarde, quando a semente original terminar, tratar-se-á do aumento isolado na atividade F.

Sol. N°	ZI	YA	YB	YC	YD	YE	YF	CCVA	CCVB	CCVC	CCVD	CCVE	CCVF
4*	9	1	1	2	1	2	2	0	0	0	1	0	1

Novamente, verifica-se um segundo empate mas desta vez entre as atividades D e F. Opte-se agora por acrescentar uma equipa em F e no fim regressar-se-á ao aumento em D.

Sol. N°	ZI	YA	YB	YC	YD	YE	YF	CCVA	CCVB	CCVC	CCVD	CCVE	CCVF
5*	10	1	1	2	1	2	3	0	0	0	2	0	/
6*	11	1	1	2	2	2	3	2	0	0	0	1	/
7*	12	2	1	2	2	2	3	0	1	0	0	1	/

Mais uma vez, surge um terceiro empate mas agora entre as atividades B e E. Inicialmente, escolha-se aumentar E para mais tarde regressar a um aumento em B.

Sol. N°	ZI	YA	YB	YC	YD	YE	YF	CCVA	CCVB	CCVC	CCVD	CCVE	CCVF
8*	13	2	1	2	2	3	3	0	1	1	0	/	/

Surge de imediato o quarto empate mas por sua vez entre as atividades B e C. Por agora, dê-se prioridade a um aumento em C.

Sol. N°	ZI	YA	YB	YC	YD	YE	YF	CCVA	CCVB	CCVC	CCVD	CCVE	CCVF
9*	14	2	1	3	2	3	3	0	2	/	0	/	/
10*	15	2	2	3	2	3	3	0	0	/	1	/	/
11*	16	2	2	3	3	3	3	2	0	/	/	/	/
12*	17	3	2	3	3	3	3	/	1	/	/	/	/
13*	18	3	3	3	3	3	3	/	/	/	/	/	/
Terminou devido à condição de paragem (2)													

Atingindo-se uma solução em que o número total de equipas utilizadas corresponde a $N * m$, então a semente original chegou ao seu fim.

Debrucemo-nos agora sobre a nova semente gerada pelo primeiro empate entre as atividades C e F.

Sol. N°	ZI	YA	YB	YC	YD	YE	YF	CCVA	CCVB	CCVC	CCVD	CCVE	CCVF
14*	9	1	1	1	1	2	3	0	0	2	0	0	0
Terminou devido à condição de paragem (3)													

Neste caso, como a próxima solução proposta iria coincidir com uma já apresentada anteriormente, nomeadamente a N°5*, não existe interesse em determiná-la e, logicamente, esta semente terminou.

Avancemos, por sua vez, para uma nova semente originada pelo segundo empate entre as atividades D e F.

Sol. N°	ZI	YA	YB	YC	YD	YE	YF	CCVA	CCVB	CCVC	CCVD	CCVE	CCVF
15	10	1	1	2	2	2	2	2	0	0	0	0	1
16*	11	2	1	2	2	2	2	0	1	0	0	0	1

Verifica-se que surge um falso empate, isto porque aumentar uma equipa em F iria traduzir-se na solução N°7*, já determinada atrás. Assim, prossiga-se com um aumento na atividade B.

Sol. N°	ZI	YA	YB	YC	YD	YE	YF	CCVA	CCVB	CCVC	CCVD	CCVE	CCVF
17	12	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	1
18	13	2	2	2	2	2	3	0	0	0	0	1	
19	14	2	2	2	2	3	3	0	0	1	0		
Terminou devido à condição de paragem (3)													

Visto que a próxima solução que iria ser sugerida coincide com a N°10*, que já havia sido explicitada anteriormente, esta semente atingiu a sua meta final.

Adicionalmente, note-se que o terceiro e quarto empates iriam gerar, respetivamente, sementes começadas pelas soluções N°18 e N°19 que foram determinadas anteriormente. Assim sendo, não existiria valor acrescentado por se analisar estas últimas sementes e, portanto, a heurística terminou.

Finalmente, torna-se oportuno aferir os resultados em que esta heurística convergiu:

- $\% \text{ da FP obtida} = \frac{15}{16} = 93,75\%$
- $\text{Eficiência} = \frac{15}{19} = 78,95\%$

3.1.5 Resumo dos resultados

A Tabela 9 apresenta os resultados das fronteiras aproximadas obtidas pela aplicação de cada uma das heurísticas, confrontando-as com a verdadeira fronteira de Pareto. Verifica-se, em geral, uma boa cobertura de todo o espaço de soluções não dominadas e uma reduzida distância entre a verdadeira FP e cada uma das FP aproximadas.

#	FP verdadeira			FP Heurística 1			FP Heurística 2			FP Heurística 3			FP Heurística 4		
	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
1	6	9,74	30015,7	6	9,74	30015,7	6	9,74	30015,7	6	9,74	30015,7	6	9,74	30015,7
2	7	6,92	30012,4	7	6,92	30012,4	7	6,92	30012,4	7	6,92	30012,4	7	6,92	30012,4
3	8	5,10	30010,7	8	5,10	30010,7	8	5,10	30010,7	8	5,10	30010,7	8	5,10	30010,7
4	9	4,76	30010,5	9	5,10	30009,9	9	4,76	30010,5	9	4,76	30010,5	9	4,76	30010,5
5	9	5,10	30009,9	11	5,10	30008,7	10	3,80	30008,9	9	5,10	30009,9	9	5,10	30009,9
6	10	3,80	30008,9	15	2,10	30006,2	11	3,75	30008,7	10	3,80	30008,9	10	3,80	30008,9
7	11	3,75	30008,7	16	1,80	30006,0	12	3,20	30008,4	11	3,75	30008,7	11	3,75	30008,7
8	11	5,10	30008,7	17	0,40	30004,9	14	2,51	30006,8	12	3,20	30008,4	12	3,20	30008,4
9	12	3,20	30008,4	18	0,00	30004,7	15	2,10	30006,2	12	3,75	30007,6	12	3,75	30007,6
10	12	3,75	30007,6	9	4,76	30010,5	16	1,80	30006,0	13	3,20	30007,3	13	3,20	30007,3
11	13	3,20	30007,3	10	3,80	30008,9	17	0,40	30004,9	14	2,51	30006,8	14	2,51	30006,8
12	14	2,51	30006,8	11	3,75	30008,7	18	0,00	30004,7	15	2,10	30006,2	15	2,10	30006,2
13	15	2,10	30006,2	12	3,75	30007,6	10	6,01	30011,6	16	1,80	30006,0	16	1,80	30006,0
14	16	1,80	30006,0	12	3,20	30008,4	11	3,80	30009,0	17	0,40	30004,9	17	0,40	30004,9
15	17	0,40	30004,9	13	3,20	30007,3	----	----	----	18	0,00	30004,7	18	0,00	30004,7
16	18	0,00	30004,7	14	2,51	30006,8	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tabela 9 – Fronteira de Pareto exata e resultado das heurísticas (Exemplo 1).

A Tabela 10 indica os resultados das medidas de avaliação agrupados pela respectiva heurística utilizada. Complementarmente, como termo de comparação, são também apresentados os valores médios verificados em cada simulação na experiência computacional da secção 1 – Parte III, envolvendo a atribuição de uma distribuição uniforme para o número de equipas a executar cada uma das atividades.

Método utilizado:	Percentagem da FP obtida	Percentagem de Eficiência
Experiência inicial	10,63%	2,17%
Heurística 1	100,00%	57,14%
Heurística 2	75,00%	80,00%
Heurística 3	93,75%	75,00%
Heurística 4	93,75%	78,95%

Tabela 10 – Resumo dos resultados obtidos pela aplicação das heurísticas (Exemplo 1).

Na ausência de informação comparativa relativamente a outros exemplos, é precipitado nesta fase retirar grandes conclusões. No entanto, existem alguns aspetos relativamente evidentes. Em primeiro lugar, é notória a melhoria tanto ao nível da eficácia como da eficiência que a utilização de heurísticas permitiu obter em relação à experiência inicial, demonstrando que, neste caso, este problema pôde ser solucionado de uma forma bastante razoável pelas heurísticas. De facto, todas as heurísticas apresentam uma eficácia superior a 75% e, mesmo ao nível da eficiência, o pior cenário é de aproximadamente 57%, o que também constitui um valor favorável.

Atendendo a ambas as medidas de avaliação, a heurística 4 apresenta resultados bastante interessantes. De facto, associa uma elevada taxa de eficácia (93,75%) a um bom nível de eficiência (78,95%). Esta heurística gera um bom compromisso entre as duas dimensões consideradas.

Apesar disso, globalmente, a heurística 1 foi a que demonstrou uma eficácia superior, permitindo, inclusivamente, descobrir a totalidade da FP. Por outro lado, a heurística 2 obteve o melhor grau de eficiência registado, nomeadamente de 80%.

3.2 Exemplo 2

Para investigar a influência que diferentes tipos de parâmetros podem ter nas soluções não dominadas exatas de uma rede em específico, experimentemos utilizar a rede de projetos do Exemplo 1 (Figura 9), modificando os seus parâmetros mais relevantes para refletir o cenário da Tabela 11. Para além disso, considere-se que $E_j = 12$ e mantenha-se o valor de $\delta = 0,8$.

i	D_i	r_i	γ_i	f_i
A	7	0,8	1,5	1000
B	3	0,9	2	2000
C	8	0,65	3	3000
D	4	0,85	1	1300
E	1	0,7	2,5	1200
F	2	0,6	0,5	1500

Tabela 11 – Parâmetros das atividades (Exemplo 2).

Novamente através de enumeração exaustiva de todas as possibilidades de afetação de equipas às atividades, verificam-se as seguintes soluções não dominadas para este problema:

Solução não dominada Nº:	Z1 = Número de Equipas	Z2 = Atraso Máximo	Z3 = Custo Total	A	B	C	D	E	F
1	6	12,81	30133,25	1	1	1	1	1	1
2	7	11,28	30144,22	1	1	2	1	1	1
3	8	8,77	30141,66	2	1	2	1	1	1
4	10	6,38	30150,25	3	1	3	1	1	1
5	11	5,27	30150,27	3	1	3	2	1	1
6	12	4,70	30150,33	3	1	3	2	2	1
7	13	4,00	30150,52	3	1	3	2	3	1

Tabela 12 – Conjunto das soluções não dominadas exatas (Exemplo 2).

Para permitir uma interpretação mais intuitiva, uma representação gráfica da fronteira de Pareto é exibida na Figura 17.

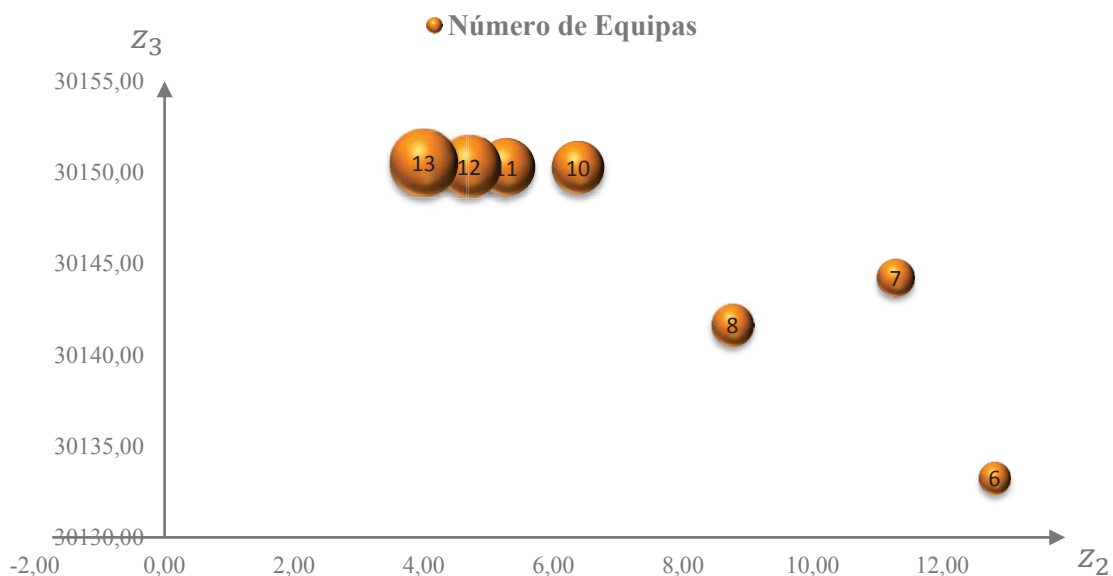


Figura 17 – Fronteira de Pareto (Exemplo 2).

Contrariamente ao que se verificava pela utilização dos parâmetros originais, agora observa-se que já não existem soluções eficientes para todos os números totais de equipas de $m, \dots, N * m$. De igual modo, também deixou de se constatar a relação aproximadamente linear que existia entre o custo total e o atraso máximo. Efetivamente, para este conjunto de soluções não dominadas exatas, à medida que caminhamos ao longo do eixo das abcissas, o custo total tende a diminuir, evidenciando a presença de uma correlação negativa entre o atraso máximo (z_2) e o custo total referido (z_3).

Verifica-se, ainda, que a introdução de equipas adicionais, na solução que minimiza o número total de equipas (z_1), permite diminuir o atraso máximo mas, em conformidade com o que foi dito anteriormente, prejudica os custos totais das soluções apresentadas. Inclusivamente, a solução eficiente referente a seis equipas minimiza simultaneamente as funções objetivo z_1 e z_3 , sendo no entanto a que mais agrava o atraso máximo. Assim, com estes novos parâmetros, o efeito de aprendizagem tem um papel particularmente importante na redução dos custos totais das soluções. Adicionalmente, verifica-se que a utilização de um número total de equipas superior a 13 não confere nenhuma solução eficiente, evidenciando a impossibilidade de diminuir o atraso máximo pela via de inserir mais equipas à solução que minimiza z_2 .

É, também, de realçar que, do ponto de vista dos custos, a solução que minimiza simultaneamente z_1 e z_3 fá-lo, sobretudo, devido ao facto de o parâmetro γ_i ser tendencialmente superior a δ .

Vejamos de seguida que resultados seriam de esperar caso as heurísticas propostas nesta dissertação fossem aplicadas a este novo cenário. Dado que a aplicação detalhada das mesmas já foi efetuada anteriormente, cingir-me-ei, de modo geral, a demonstrar apenas os resultados finais em que as heurísticas convergem. O significado de todo o simbolismo e notação utilizada coincide exatamente com o que foi apresentado nas respetivas aplicações anteriores.

3.2.1 Heurística 1

Nesta heurística, comecemos por observar o que sucede na solução inicial:

Sol. N°	Z I	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	A	B	C	D	E	F
1*	6	1	1	1	1	1	1	2,543	14,841	0,000	3,507	0,000	3,507

Com efeito, verificam-se dois empates, um entre as atividades C e E para a posição número um, e outro entre D e F para a posição número três. Aplicando os critérios de desempate referidos, dão-se prioridade nestes empates às atividades C e D dado que possuem maior duração inicial que os seus concorrentes (ver Tabela 11).

Tendo isto em consideração, ordenando as atividades de forma crescente pelo valor das suas folgas médias, obtém-se a seguinte sequência: $T_{1C} \rightarrow T_{2E} \rightarrow T_{3A} \rightarrow T_{4D} \rightarrow T_{5F} \rightarrow T_{6B}$.

Vejamus de seguida as soluções que serão propostas tendo como referencial a ordem determinada anteriormente, excetuando-se apenas a solução N°1* já identificada.

Sol. N°	Z I	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F
2*	7	1	1	2	1	1	1
3	8	1	1	2	1	2	1
4	8	1	1	3	1	1	1
5	9	2	1	2	1	2	1
6	9	1	1	3	1	2	1
7	10	2	1	2	2	2	1
8	10	1	1	3	1	3	1
9	10	2	1	3	1	2	1
10	11	2	1	2	2	2	2
11	11	2	1	3	1	3	1
12	11	2	1	3	2	2	1
13	12	2	2	2	2	2	2
14	12	3	1	3	1	3	1
15	12	2	1	3	2	3	1
16	12	2	1	3	2	2	2
17	13	2	2	3	2	2	2
18*	13	3	1	3	2	3	1
19	13	2	1	3	2	3	2
20	14	2	2	3	2	3	2
21	14	3	1	3	3	3	1
22	14	3	1	3	2	3	2
23	15	3	2	3	2	3	2
24	15	3	1	3	3	3	2
25	16	3	2	3	3	3	2
26	16	3	1	3	3	3	3
27	17	3	2	3	3	3	3
28	18	3	3	3	3	3	3

Realizando este procedimento, a heurística terminou e é oportuno proceder no sentido de conferir os resultados que foram alcançados pela mesma, tendo em consideração o conjunto das soluções não dominadas exatas da Tabela 12. Assim, obtêm-se os seguintes valores para as medidas de avaliação:

- $\% \text{ da FP obtida} = \frac{3}{7} = 42,86\%$
- $\text{Eficiência} = \frac{3}{28} = 10,71\%$

Já tendo esta heurística sido aplicada por duas vezes, nesta fase é relativamente claro as dificuldades que podem surgir ao colocá-la em prática. Apesar de ser a heurística mais simples, é muito fácil uma pessoa “perder-se” na determinação de todas as soluções que respeitam a ordem indicada. Evidentemente que este problema deixa facilmente de existir caso a heurística seja programada computacionalmente, no entanto é relevante referir este aspeto.

Contudo, a limitação mais redutora da mesma prende-se com o facto da sua eficácia e eficiência ter descido abruptamente do Exemplo 1 para o Exemplo 2. Recordemo-nos que no Exemplo 1 esta heurística convergiu em 100% da FP e obteve um nível de eficiência de 57,14%. Este fenómeno já era expectável e apenas vem confirmar que as folgas médias das atividades na solução correspondente à utilização de um número total de m equipas não têm, por si só, capacidade para explicar todas as soluções não dominadas exatas que, efetivamente, se verificam. Assim, a opção por explorar o conceito de folgas dinâmicas irá revelar-se particularmente útil, neste exemplo, como veremos na aplicação das heurísticas seguintes.

Outra limitação perceptível nesta heurística é que o número de soluções propostas pela mesma depende diretamente da dimensão do problema e não do número de soluções não dominadas exatas que o mesmo possa ter. Verifica-se, portanto, que na sua aplicação a região admissível é percorrida desde a solução inicial associada à utilização de m equipas até ao limite superior referente a $N * m$, não existindo nenhuma condição de paragem intermédia, como se constata nas restantes heurísticas. Isto prejudica, naturalmente, a eficiência da mesma. Esta situação não era assim tão notória no Exemplo 1, pois existia pelo menos uma solução eficiente para cada número de equipas de m a $N * m$. Porém esse não foi o caso do Exemplo 2 e, parcialmente por isso, assistiu-se à queda acentuada da sua eficiência.

Em suma, a utilização desta heurística, de um modo genérico, aparenta não ser tão apropriada em comparação com as restantes heurísticas desenvolvidas nesta dissertação.

3.2.2 Heurística 2

Tendo por base, sobretudo, folgas dinâmicas para as atividades, obtêm-se as seguintes soluções propostas:

Sol. N°	ZI	YA	YB	YC	YD	YE	YF	A	B	C	D	E	F
1*	6	1	1	1	1	1	1	-	-	0	-	0	-
2*	7	1	1	2	1	1	1	0	-	0	-	0	-
3	7	1	1	1	1	2	1	-	-	0	-	0	-
4	8	1	1	3	1	1	1	0	-	/	-	0	-
5	8	1	1	1	1	3	1	-	-	0	-	/	-
6*	8	2	1	2	1	1	1	-	-	0	-	0	-
7	8	1	1	2	1	2	1	0	-	0	-	0	-
8	9	2	1	3	1	1	1	0	-	/	-	0	-
9	9	1	1	2	1	3	1	0	-	0	-	/	-
10	9	2	1	2	1	2	1	-	-	0	-	0	-
11	9	1	1	3	1	2	1	0	-	/	-	0	-
12*	10	3	1	3	1	1	1	/	-	/	0	0,1609	0,55
13	10	1	1	3	1	3	1	0	-	/	-	/	-
14	10	2	1	3	1	2	1	0	-	/	-	0	-
15	10	2	1	2	1	3	1	-	-	0	-	/	-
16*	11	3	1	3	2	1	1	/	-	/	-	0	-
17	11	2	1	3	1	3	1	0	-	/	-	/	-
18	11	3	1	3	1	2	1	/	-	/	0	-	0,2
19*	12	3	1	3	2	2	1	/	-	/	-	0	-
20	12	3	1	3	1	3	1	/	-	/	0	/	-
21*	13	3	1	3	2	3	1	/	-	/	-	/	-

Antes de se avançar para as medidas de avaliação, existem duas ilações pertinentes a retirar pela observação do conjunto das soluções propostas por esta heurística. Relativamente à primeira, é perfeitamente visível que, pela primeira vez, uma heurística termina alguma das suas sementes devido à condição de paragem (1). De facto, neste caso, não se chega a atingir soluções propostas que utilizem um número máximo de equipas, correspondente a 18 ($N * m$), pois em certo momento deixam de se constatar quaisquer atividades candidatas. Inclusivamente, é interessante verificar que a solução proposta com maior número de equipas, mais concretamente 13, corresponde exatamente à solução não dominada exata que, do conjunto de todas as soluções da Tabela 12, é a que apresenta um maior número total de equipas. Por outras palavras, no processo de se introduzirem equipas adicionais, a heurística termina precisamente no mesmo teto máximo que a fronteira de Pareto, como pode ser verificado graficamente na Figura 17. Esta particularidade é, portanto, positiva.

No que se refere à segunda ilação, atente-se na figura seguinte que representa a rede integrada da realização dos três projetos, correspondente à solução inicial N°1*, em que se utilizam apenas seis equipas na execução das atividades:

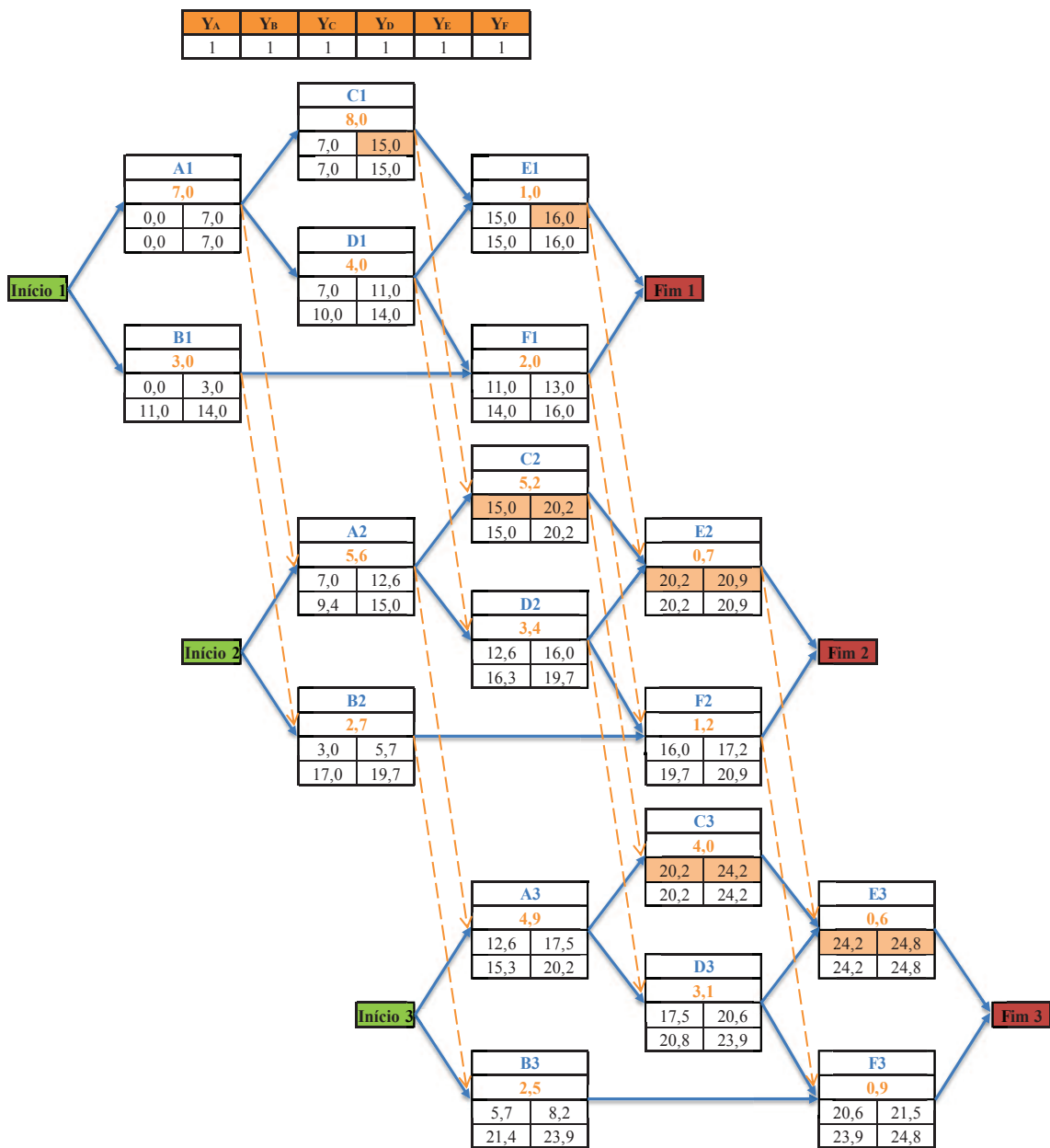


Figura 18 – Aplicação do CPM utilizando-se um total de 6 equipas (Exemplo 2).

Complementarmente, observe-se de novo o cálculo das folgas médias para as atividades, de acordo com esta heurística, na solução N°1*:

Sol. N°	ZI	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	A	B	C	D	E	F
1*	6	1	1	1	1	1	1	-	-	0	-	0	-

Interpretando os dados proporcionados pela heurística, os mesmos apontam para um eventual interesse em se aumentar o número de equipas a executarem as atividades C e E, dado que ambas apresentam folgas iguais a zero nos projetos 2 e 3. Contudo, tendo como pano de fundo o cenário da Figura 18, a pergunta que se coloca agora é a seguinte: será que poderá existir, de facto, um verdadeiro interesse em aumentar isoladamente o número de equipas em ambas estas atividades?

No que se refere à atividade C, a resposta é simples e verifica-se que sim, pois as atividades C2 e C3 são críticas nos projetos 2 e 3 e o que determina os seus IMC são as respetivas execuções anteriores das mesmas, C1 e C2. Deste modo, eliminar a restrição de precedência (9) que a atividade C2 tem em relação a C1 pode beneficiar a rapidez de execução dos projetos 2 e 3 e, conseqüentemente, tal pode ser benéfico, pelo menos, para uma das funções objetivo z_2 e z_3 . Inclusivamente, tal é verdade, dado que a solução proposta N°2* é eficiente devido, somente, a um aumento unitário do número de equipas em C.

Quanto à atividade E, o mesmo não se verifica, visto que E2 e E3 são críticas mas não podem ver os seus tempos de execução melhorados por se eliminarem as suas relações de precedência relativamente às suas execuções anteriores, dado que os seus IMC são determinados, respetivamente, pelos FMC das atividades C2 e C3 e não pelas próprias atividades. Assim, no contexto da solução N°1*, não existe qualquer interesse em inserir isoladamente equipas adicionais na atividade E.

Pelo facto de esta heurística não se conseguir ajustar a este tipo de situações, pode ocorrer que a mesma seja direccionada, em parte, para procurar soluções num espaço da região admissível onde *a priori* já se sabe que não existirão soluções eficientes, uma vez que é certo que nunca melhorarão z_2 , prejudicando sempre z_1 e z_3 . Na aplicação desta heurística, as soluções propostas N°3 e N°5 são nítidos exemplos disso mesmo. Neste sentido, é evidente que estas duas últimas serão sempre dominadas pela solução correspondente a m equipas.

É ainda provável que as soluções dominadas N°3 e N°5 possam evoluir para outras soluções também elas não apropriadas, como é o caso da N°9, dando origem a um ciclo negativo de soluções que, naturalmente, prejudicarão a eficiência da heurística.

Como já havia sido referido anteriormente, nesta dissertação, este tipo de acontecimentos indesejáveis não sucedem na heurística dos CCVs, pois ela tem capacidade de se resguardar contra os mesmos. De realçar que tal pode ser verificado pelas soluções candidatas e, efetivamente, propostas quando essa heurística for aplicada a este exemplo na secção subsequente 3.2.4.

Por fim, apresentam-se, de seguida, as medidas de avaliação da heurística 2:

- $\% \text{ da FP obtida} = \frac{7}{7} = 100\%$
- $\text{Eficiência} = \frac{7}{21} = 33,33\%$

3.2.3 Heurística 3

De modo a aplicar esta heurística, inicialmente teríamos de calcular o valor da tolerância, neste caso equivalente a:

- $Tolerância = \frac{\sum_{i=A}^F D_{i1}}{6} = 4,17$

Contudo, como na heurística 2 assistiu-se a uma quebra acentuada da eficiência do primeiro cenário para este novo Exemplo 2 (80% para 33,33%), poderá ser pertinente reduzir este valor. Sendo que os empates dependem deste parâmetro, a sua escolha tem um impacto direto tanto na eficácia como na eficiência da heurística. Assim, tendencialmente, aumentar este valor torna a existência de empates mais provável, podendo conduzir a uma melhor eficácia ao mesmo tempo que isso pode ter um impacto negativo na eficiência, pois estar-se-ão a propor soluções adicionais e, evidentemente, nem todas serão eficientes. Diminuí-lo, por sua vez, poderá ter consequências diametralmente opostas. Com efeito, realizar uma análise de sensibilidade a este parâmetro poderia ser um tópico interessante.

Para este exemplo, opte-se por utilizar um valor de tolerância igual a dois e prossiga-se à aplicação da heurística.

- $Tolerância = 2$

Sol. N°	Z1	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	W _{1A}	W _{1B}	W _{1C}	W _{1D}	W _{1E}	W _{1F}
1*	6	1	1	1	1	1	1	-	-	4,04	-	0,57	-
2*	7	1	1	2	1	1	1	4,91	-	5,20	-	0,57	-
3	8	1	1	3	1	1	1	4,91	-	/	-	0,57	-
4*	8	2	1	2	1	1	1	-	-	5,20	-	0,57	-
5	9	2	1	3	1	1	1	5,60	-	/	-	0,57	-
6*	10	3	1	3	1	1	1	/	-	/	3,09	0,41	0,34
7*	11	3	1	3	2	1	1	/	-	/	-	0,57	-
8*	12	3	1	3	2	2	1	/	-	/	-	0,70	-
9*	13	3	1	3	2	3	1	/	-	/	-	/	-

- $\% \text{ da FP obtida} = \frac{7}{7} = 100\%$

- $Eficiência = \frac{7}{9} = 77,78\%$

Visto que foi possível encontrar a totalidade da fronteira de Pareto para este problema, qualquer valor de tolerância superior ao que foi utilizado apenas poderia contribuir para degradar os resultados obtidos ao nível da eficiência. De facto, como se suspeitava no início, para este exemplo, o valor de 4,17 seria demasiado elevado originando, seguramente, empates adicionais redundantes.

Adicionalmente, no procedimento desta heurística apenas se constatou um único empate na solução N°2* que, convenientemente, proporcionou a solução eficiente N°4*. Após este empate, curiosamente, tanto a solução N°3 como a N°4* convergem exatamente na mesma solução, isto é, a N°5.

Assim, caso não se tivesse considerado qualquer valor para a tolerância (tolerância = 0) os resultados da heurística seriam os seguintes:

- $\% \text{ da FP obtida}' = \frac{6}{7} = 85,71\%$
- $\text{Eficiência}' = \frac{6}{8} = 75\%$

Analisando estes resultados, verifica-se que a ausência de tolerância traduzir-se-ia em impactos negativos em ambas as medidas de avaliação, especialmente ao nível da eficácia, onde se assistiu a uma redução de aproximadamente 14,30%.

Neste sentido, e a título de curiosidade, a tolerância ótima para este problema, mantendo a descoberta da totalidade da fronteira de Pareto, seria de 0,29, que corresponde aproximadamente à diferença mínima que teria de existir, para assegurar o empate na solução N°2* ($5,20 - 4,91 = 0,29$) e forçar a descoberta da solução N°4*. Qualquer valor superior a este apenas poderia ter consequências negativas para os resultados finais desta heurística.

3.2.4 Heurística 4

Tendo na sua gênese o conceito de contributo crítico válido, eis então as soluções propostas por esta heurística:

Sol. N°	ZI	Y _A	Y _B	Y _C	Y _D	Y _E	Y _F	CCV _A	CCV _B	CCV _C	CCV _D	CCV _E	CCV _F
1*	6	1	1	1	1	1	1	0	0	2	0	0	0
2*	7	1	1	2	1	1	1	2	0	1	0	0	0
3*	8	2	1	2	1	1	1	0	0	1	0	1	0
4	9	2	1	3	1	1	1	1	0	/	0	1	0
5	9	2	1	2	1	2	1	0	0	1	0	0	0
6*	10	3	1	3	1	1	1	/	0	/	1	1	0
7	10	2	1	3	1	2	1	1	0	/	0	0	0
8*	11	3	1	3	2	1	1	/	0	/	0	2	0
9	11	3	1	3	1	2	1	/	0	/	1	0	0
10*	12	3	1	3	2	2	1	/	0	/	0	1	0
11*	13	3	1	3	2	3	1	/	0	/	0	/	0

À semelhança das duas heurísticas anteriores, verifica-se que a condição de paragem (1) determina o fim desta heurística, visto que na solução N°11* já não existem atividades cuja incorporação de equipas adicionais poderia gerar algum CCV.

Retomando ao que já havia sido adiantado na secção 3.2.2, merece destaque o facto de ambas as primeiras soluções propostas por esta heurística atribuírem zero CCVs à atividade E, identificando adequadamente que não existe interesse em aumentar o número de equipas nessa atividade e nessas soluções. Pelo contrário, tal não acontecia em ambas as heurísticas anteriores que, com maior ou menor impacto, evidenciaram sempre um potencial interesse em aumentar o número de equipas na atividade E nas soluções iniciais.

As consequências do erro anterior são bem visíveis, particularmente nos resultados da heurística 2, em que a eficiência sofreu uma queda abrupta em comparação com o que havia sido verificado para essa heurística no Exemplo 1. Porém, mais apropriado será, talvez, comparar esses resultados com os que se seguem, obtidos por via da heurística 4 aplicada ao Exemplo 2:

- $\% \text{ da FP obtida} = \frac{7}{7} = 100,00\%$
- $\text{Eficiência} = \frac{7}{11} = 63,64\%$

De facto, para um mesmo nível de eficácia, a heurística dos CCVs permite adquirir um valor de eficiência consideravelmente superior ($63,64\% > 33,33\%$).

De notar ainda que, no Exemplo 2, este erro não afetou os resultados da heurística 3, mas apenas por mero acaso. Na verdade, para que tal acontecesse, seria apenas necessário ter-se utilizado um valor superior para o parâmetro da tolerância e, certamente, isso teria efeitos muito negativos na sua eficiência.

Assim, apesar de ser um atrevimento retirar ilações sem uma ampla base de sustentação, parecem existir incipientes indícios de que a heurística 4 poderá ter uma melhor capacidade para realizar uma procura mais bem direcionada de soluções eficientes no espaço da região admissível do problema.

3.2.5 Resumo dos resultados

A Tabela 13 apresenta, para o Exemplo 2, os resultados das fronteiras aproximadas obtidas pela aplicação de cada uma das heurísticas, confrontando-as com a verdadeira fronteira de Pareto. Verifica-se novamente uma boa cobertura de todo o espaço de soluções não dominadas e uma reduzida distância entre a verdadeira FP e cada uma das FP aproximadas.

#	FP verdadeira			FP Heurística 1			FP Heurística 2			FP Heurística 3			FP Heurística 4		
	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3	Z1	Z2	Z3
1	6	12,81	30133,2	6	12,81	30133,2	6	12,81	30133,2	6	12,81	30133,2	6	12,81	30133,2
2	7	11,28	30144,2	7	11,28	30144,2	7	11,28	30144,2	7	11,28	30144,2	7	11,28	30144,2
3	8	8,77	30141,7	9	8,90	30142,3	8	8,77	30141,7	8	8,77	30141,7	8	8,77	30141,7
4	10	6,38	30150,2	12	6,49	30151,6	10	6,38	30150,2	10	6,38	30150,2	10	6,38	30150,2
5	11	5,27	30150,3	13	4,00	30150,5	11	5,27	30150,3	11	5,27	30150,3	11	5,27	30150,3
6	12	4,70	30150,3	----	----	----	12	4,70	30150,3	12	4,70	30150,3	12	4,70	30150,3
7	13	4,00	30150,5	----	----	----	13	4,00	30150,5	13	4,00	30150,5	13	4,00	30150,5

Tabela 13 - Fronteira de Pareto exata e resultado das heurísticas (Exemplo 2).

Na Tabela 14 encontram-se exibidos os dados relativos aos resultados da aplicação das heurísticas para o Exemplo 2. Por pertinência, será também apresentada informação comparativa referente ao Exemplo 1.

Heurística N°:	Exemplo 2		Exemplo 1	
	% da FP obtida	% de Eficiência	% da FP obtida	% de Eficiência
1	42,86%	10,71%	100,00%	57,14%
2	100,00%	33,33%	75,00%	80,00%
3	100,00%	77,78%	93,75%	75,00%
4	100,00%	63,64%	93,75%	78,95%

Tabela 14 - Resumo dos resultados obtidos pela aplicação das heurísticas (Exemplo 2).

De um modo geral, as ilações mais determinantes que se podem retirar pela observação dos resultados das heurísticas para os dois exemplos já foram referidas anteriormente ao longo da aplicação das heurísticas. Assim, relativamente ao Exemplo 2, já foi analisado atrás o porquê da quebra nos resultados da heurística 1, a razão pela qual se assiste a uma redução acentuada da eficiência da heurística 2 e, por fim, o que leva as duas últimas heurísticas a manterem a sua estabilidade.

Exposto isto, excluindo a heurística 1 da análise, verifica-se uma tendência para que as heurísticas denotem maior eficácia no Exemplo 2 do que no Exemplo 1. Inclusivamente, todas elas conseguem descobrir a totalidade da FP do problema, facto esse muito positivo.

Possivelmente, isso terá acontecido porque no Exemplo 2 não existiam soluções não dominadas com igual número de equipas, o que resulta num decréscimo da complexidade em encontrar a FP completa. Na verdade, o fenómeno de no Exemplo 1 existirem várias soluções eficientes com equivalente número de equipas, poderá traduzir-se num conflito difícil de resolver pelas heurísticas, visto que nem sempre um empate irá permitir abarcar as várias soluções não dominadas. É exatamente por essa razão, conferindo os resultados em detalhe, que a heurística 4 perde uma solução eficiente de 12 equipas no Exemplo 1, mais concretamente a solução N°9 da Tabela 7.

Adicionalmente, a única heurística que viu melhorar ambas as suas medidas de avaliação foi a heurística 3. No entanto, conforme analisado anteriormente, devo reiterar que tais resultados dependem muito da incerteza inerente à definição do parâmetro tolerância.

Neste sentido, é unânime considerar que novamente o procedimento que melhor desempenho apresenta é a heurística 4. Contudo, no Exemplo 2, a mesma demonstra uma ligeira perda de eficiência, que é provável ter ocorrido devido ao facto de não existirem soluções eficientes com igual número de equipas, o que torna alguns empates não desejáveis. Apesar de tudo, a verdade é que a heurística dos CCVs descobre a totalidade das sete soluções não dominadas exatas num total de onze propostas, sendo este, na minha ótica, um resultado muito positivo.

Conclusão

Esta dissertação debruçou-se sobre o problema da gestão de projetos repetitivos com incorporação do efeito de aprendizagem. Para tal, foi utilizado o modelo matemático multiobjetivo apresentado na secção 2 – Parte II. Em relação a este, o gestor de projetos tem a capacidade de influenciar as dimensões tipicamente conflitantes do tempo, custo e qualidade, necessitando, para tal, de determinar o número de equipas que irá trabalhar em cada atividade ao longo dos vários projetos. Desta decisão dependerá, naturalmente, o maior ou menor aproveitamento dos benefícios inerentes à aprendizagem, conduzindo ao desafio estratégico enunciado na secção 2.1 – Parte II.

De modo a procurar auxiliar o gestor de projetos a solucionar eficientemente este problema, na secção 2 – Parte III foram desenvolvidas quatro heurísticas. A sua utilização teve como finalidade gerar aproximações à fronteira de Pareto do problema.

Em virtude do reduzido horizonte temporal implícito a esta dissertação, foi apenas possível aplicar as heurísticas anteriores a dois exemplos simples, em estilo de “prova de conceito”. Nos casos específicos em que as mesmas foram utilizadas, verificou-se que o problema de gestão foi resolvido de uma forma bastante razoável, especialmente pela heurística 4. Neste sentido, poderá ser interessante, no futuro, programá-la computacionalmente e averiguar se os resultados aqui alcançados se mantêm válidos para outro tipo de redes e parâmetros. Assim, esta constitui a principal limitação deste estudo mas, simultaneamente, um relevante tópico de investigação futura.

Na eventualidade de estas conclusões se generalizarem, os gestores de projetos possuem agora uma ferramenta que contribuirá para uma perceção explícita do compromisso entre os aspetos conflitantes tempo, custo e qualidade, considerando-se, ainda, o impacto que o fator aprendizagem pode exercer sobre estes.

Somando-se à limitação identificada anteriormente, na secção 1.2 – Parte II pudemos constatar que as medidas de avaliação, através das quais se aferiu a qualidade das heurísticas, não são as mais adequadas caso se pretenda avaliar um conjunto mais alargado de aproximações das FP. Apesar disso, neste estudo, como os níveis de eficácia foram, de modo geral, positivos, este fator foi muito atenuado. De facto, nada indica que a utilização de medidas mais rigorosas, nos exemplos analisados, fosse convergir em interpretações ou ilações diferentes daquelas que, efetivamente, se retiraram, daí não ter havido a necessidade

das fronteiras serem comparadas graficamente. Contudo, este é um aspeto fundamental que deve ser tido em consideração em investigações futuras. Adicionalmente, como a eficiência também poderá ser vista como o esforço necessário para se aplicarem as heurísticas, excetuando-se a primeira, importa dizer que as mesmas apresentam aproximadamente a mesma exigência. De notar que a incerteza associada à definição do parâmetro tolerância que conduz à existência de empates na heurística 3 implica uma complexidade acrescida. Outra limitação evidente prende-se com a necessidade de se aplicar o CPM para que as heurísticas possam ser executadas, o que implica algum trabalho suplementar.

Para além do que já tive oportunidade de mencionar, termino com a convicção de que muito há ainda por fazer no âmbito deste problema. Na minha investigação, posso salientar e apontar os seguintes fundamentos para novos pontos de partida:

- As heurísticas aqui desenvolvidas devem ser testadas amplamente, no sentido de se perceber quais as que apresentam melhor desempenho em determinadas circunstâncias particulares (redes e parâmetros). Nesta perspetiva, é ainda provável que algumas tenham maior tendência para descobrir as melhores soluções eficientes do ponto de vista dos custos e outras do atraso máximo. Adicionalmente, uma análise de sensibilidade ao parâmetro da tolerância na heurística 3 poderá ser algo proveitoso para os resultados da mesma;
- Relativamente à heurística mais promissora, a dos CCVs (heurística 4), talvez seja interessante procurar refiná-la, de modo a não permitir o surgimento de atividades candidatas que, efetivamente, não irão melhorar as funções objetivo z_2 e z_3 . Contudo, é de notar que tal poderá aumentar a eficiência da mesma mas prejudicar a sua eficácia, pois existem soluções intermédias dominadas que mais tarde se traduzem em não dominadas exatas. De uma forma diametralmente oposta, considerar uma regra de empate mais permissiva pode permitir melhorar a sua eficácia, sob pena de se assistir a uma redução na sua eficiência. Inclusivamente, existem suspeitas de que considerar aumentos isolados no número de equipas em todas as atividades que tenham capacidade de gerar pelo menos um CCV, irá permitir obter sempre a FP do problema. Assim, este último binómio conflituante no interior da própria heurística é, por si só, algo a ter em consideração na sua aplicação futura;
- Poderá ser sensato incorporar um custo adicional, dependente do número de equipas utilizado, mas unicamente quando este número é superior a m equipas. A razão para tal argumento será porque torna-se realista considerar que existe a necessidade em incorrer

em várias duplicações de custos, para permitir às múltiplas equipas efetuar atividades em paralelo (i.e., dos equipamentos, ferramentas de trabalho, instalações, espaço físico). Este pormenor provoca, naturalmente, uma pressão acrescida para enveredar por um número inferior de equipas e, caso a empresa não possua capacidade financeira para realizar tais investimentos, deve ser colocada uma restrição ao número máximo de equipas possível de se utilizar em determinadas atividades;

- Como as atividades são realizadas por equipas de trabalhadores especializados, talvez seja apropriado admitir um limite máximo e razoável de equipas para a execução das mesmas, dada a dificuldade em contratar/dispor desses recursos humanos específicos (Shtub *et al.*, 1996);
- No modelo, assume-se que os recursos para realizar as atividades estão disponíveis de forma ilimitada e a qualquer momento, o que em certos casos poderá não acontecer;
- Deverá ser equacionada a hipótese de se impor um limite máximo para a redução na duração das atividades a que a aprendizagem conduz, tal como foi feito em Couto & Teixeira, 2005);
- Empiricamente, em classes específicas de projetos repetitivos, seria interessante analisar quais os modelos de curva de aprendizagem que melhor se ajustam aos dados que se pretendem prever (e.g., ver Ammar & Samy, 2015);
- As interrupções na execução do trabalho colocam dificuldades à aplicação do conceito de curva de aprendizagem. Deste modo, poder-se-ia procurar introduzir os fenómenos do *esquecimento* e da *reaprendizagem* (Shtub *et al.*, 1996; Teplitz & Amor, 1998). O primeiro conduz a um retrocesso na curva de aprendizagem. Relativamente ao segundo, assim que os trabalhos retomarem e, tendo por base o declínio anterior, porventura fará sentido considerar um ritmo superior de aprendizagem do que o inicialmente estabelecido (menor taxa de aprendizagem). Tal deve suceder, pelo menos, até se atingir o nível de produtividade que se havia verificado anteriormente. O caso B, do estudo empírico de Couto & Teixeira (2005), aponta precisamente neste sentido, onde se analisou um exemplo de construção civil em Portugal que foi interrompido pelas férias da Páscoa.

Por fim, é evidente que cada um destes últimos aspetos coloca uma complexidade adicional, quer em termos do modelo de programação matemática quer em termos das heurísticas aqui desenvolvidas, na procura de solucionar o problema da gestão de projetos repetitivos em que esta investigação incidiu, contudo:

“Uma vida sem desafios não vale a pena ser vivida.”

Sócrates (469-399 a.C) – Grécia antiga

Bibliografia

- Al Sarraj, Z. M. (1990). Formal Development of Line-of-balance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 116, 689–703.
- Ammar, M. A. (2013). Integrated LOB and CPM Method for Scheduling Repetitive Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(1), 44–50.
- Ammar, M. A., & Abdel-Maged, A. F. (2013). Scheduling of repetitive projects with learning development effect. In A. B. Chang & Zhao (Eds.), *Advances in Engineering and Building Materials* (pp. 341–346). Taylor & Francis Group, London.
- Ammar, M. A., & Samy, M. (2015). Learning curve modelling of gas pipeline construction in Egypt. *International Journal of Construction Management*, 15(3), 229–238.
- Archer, N. P., & Ghasemzadeh, F. (1999). An integrated framework for project portfolio selection. *International Journal of Project Management*, 17(4), 207–216.
- Arditi, D., & Albulak, M. Z. (1986). Line-of-balance scheduling in pavement construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 112(3), 411–424.
- Arditi, D., Tokdemir, O., & Suh, K. (2001). Effect of Learning on Line-Of-Balance Scheduling. *International Journal of Project Management*, 19, 265–277.
- Aritua, B., Smith, N. J., & Bower, D. (2009). Construction client multi-projects - A complex adaptive systems perspective. *International Journal of Project Management*, 27(1), 72–79.
- Ash, R., & Smith-Daniels, D. E. (1999). The effects of learning, forgetting, and relearning on decision rule performance in multiproject scheduling. *Decision Sciences*, 30(1), 47–82.
- Ashley, D. (1980). Simulation of repetitive-unit construction. *American Society of Civil Engineers, Journal of the Construction Division*, 106(2), 185–194.
- Association for Project Management. (2012). *Association for Project Management Body of Knowledge* (6th ed.). Rirborough: Association for Project Management.
- Badukale, P. A., & Sabihuddin, S. (2014). Line of Balance. *International Journal Of Modern Engineering Research*, 4, 45–47.

- Browning, T. R., & Yassine, A. A. (2010). Resource-constrained multi-project scheduling: Priority rule performance revisited. *International Journal of Production Economics*, 126(2), 212–228.
- Carr, R. I., & Mayer, W. L. (1974). Planning Construction of Repetitive Building Units. *Journal of the Construction Division*, 10, 403–412.
- Chase, R. B., Aquilano, N. J., & Jacobs, F. R. (1995). *Production and Operations Management: Manufacturing and Services*. (Irwin, Ed.) (7th ed.).
- Cohon, J. (1978). *Multiobjective programming and planning. Mathematics in Science Engineering* (Vol. 140). New York: Academic Press.
- Cooper, R. G., Edgett, S. J., & Kleinschmidt, E. J. (1998). *Portfolio management for new products* (New York:).
- Couto, J. P., & Couto, A. M. (2010). Planning methods for repetitive construction : how the learning effect can be dealt with repetitive building construction. In *Safety, Health and Environment World Congress* (pp. 20–24). São Paulo, Brazil.
- Couto, J. P., & Teixeira, J. C. (2002). Curve of Balance Method for Planning High-rise Repetitive Building. *Civil Engineering, Department of Civil Engineering, University of Minho*, 13, 35–46.
- Couto, J. P., & Teixeira, J. C. (2004). Learning Models in Construction. *Civil Engineering, Department of Civil Engineering, University of Minho*, 19, 19–29.
- Couto, J. P., & Teixeira, J. C. (2005). Using linear model for learning curve effect on highrise floor construction. *Construction Management and Economics*, 23, 355–364.
- Dong, F., Li, M., Zhao, Y., Li, J., & Yang, Y. (2008). Software Multi-project Resource Scheduling: A Comparative Analysis. In Q. Wang, D. Pfahl, & D. M. Raffo (Eds.), *International conference on Making globally distributed software development a success story* (Vol. 5007, pp. 63–75).
- Dye, L. D., & Pennypacker, J. S. (1999). *Project Portfolio Management: Selecting and Prioritizing Projects for Competitive Advantage*. West Chester, PA, USA: Center for Business Practices.

- Dye, L. D., & Pennypacker, J. S. (2000). Project Portfolio Management and Managing Multiple Projects: Two Sides of the Same Coin? *Project Management Institute Annual Seminars & Symposium*, 7–16.
- Elonen, S., & Artto, K. A. (2003). Problems in managing internal development projects in multi-project environments. *International Journal of Project Management*, 21, 395–402.
- El-Rayes, K. (2001). Optimum planning of highway construction under A + B bidding method. *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(4), 261–269.
- Engwall, M., & Jerbrant, A. (2003). The resource allocation syndrome: The prime challenge of multi-project management? *International Journal of Project Management*, 21, 403–409.
- Esbensen, H., & Kuh, E. S. (1996). Design space exploration using the genetic algorithm. In *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'96)* (pp. 500–503). Volume 4, Piscataway, NJ. IEEE.
- Everett, J. G., & Farghal, S. (1994). Learning curve predictors for construction field operations. *Journal of Construction Engineering and Management*, 120, 603–616.
- Fonseca, C. M., & Fleming, P. J. (1996). On the performance assessment and comparison of stochastic multiobjective optimizers. In H. M. Voigt, W. Ebeling, I. Rechenberg, & H. P. Schwefel (Eds.), *Fourth International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN-IV)* (pp. 584–593). Berlin, Germany.
- Goldratt, E. M. (1997). *Critical chain: a business novel*. Great Barrington, MA: North River Press.
- Gomes da Silva, C. (2004). *Determinação do conjunto de soluções não dominadas em problemas knapsack- $\{0,1\}$ bicritério: uma abordagem com meta-heurísticas, métodos híbridos e exatos*. Ph. D. Dissertation, Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra.
- Gomes da Silva, C., & Carreira, P. (2016). Exploring the learning effect in repetitive projects. *Working Paper (in Progress)*.
- Gustavsson, T. K. (2015). Organizing to avoid project overload: The use and risks of narrowing strategies in multi-project practice. *International Journal of Project Management*, 34(1), 94–101.

- Harris, R. B., & Ioannou, P. G. (1998). Scheduling projects with repeating activities. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(4), 269–278.
- Heizer, J., & Render, B. (2008). *Operations Management* (9th ed.). Pearson International Edition.
- Herroelen, W. S. (2005). Project scheduling—theory and practice. *Production and Operations Management*, 14(4), 413–432.
- Hobday, M. (2000). The project-based organisation: an ideal form for managing complex products and systems? *Research Policy*, 29, 871–893.
- Horn, J. (1997). Multicriteria decision making. In T. Back, D. B. Fogel, & Z. Michalewicz (Eds.), *Handbook of Evolutionary Computation*. Bristol (UK): Institute of Physics Publishing.
- Huang, R. yau, & Sun, K. S. (2009). A GA optimization model for workgroup-based repetitive scheduling (WoRSM). *Advances in Engineering Software*, 40(3), 212–228.
- Kerzner, H. R. (2013). *Project Management: A systems approach to planning, scheduling and controlling* (11th ed.). John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- Khisty, C. J. (1970). The application of the “Line of Balance” technique to the construction industry. *Indian Concrete Journal*, 44(7), 297–300, 319–320.
- Kolisch, R. (1996a). Efficient priority rules for the resource-constrained project scheduling problem. *Journal of Operations Management*, 14(3), 179–192.
- Kolisch, R. (1996b). Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited: Theory and computation. *European Journal of Operational Research*, 90(2), 320–333. [http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00357-6](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(95)00357-6)
- Kolisch, R., & Hartmann, S. (1999). Heuristic algorithms for solving the resource-constrained project scheduling problem: classification and computational analysis. In J. Weglarz (Ed.), *Project scheduling: Recent Models, Algorithms and Applications* (pp. 147–178). Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Kolisch, R., & Hartmann, S. (2000). Experimental evaluation of state-of-the-art heuristics for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 127(2), 394–407.

- Kolisch, R., & Hartmann, S. (2005). Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: an update. *European Journal of Operational Research*, *174*(1), 23–37.
- Kostalova, J., Tetrevoval, L., & Svedik, J. (2015). Support of Project Management Methods by Project Management Information System. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *210*, 96–104.
- Kwak, Y. H., & Anbari, F. T. (2009). Analyzing project management research: Perspectives from top management journals. *International Journal of Project Management*, *27*(5), 435–446.
- Laslo, Z., & Goldberg, A. I. (2008). Resource allocation under uncertainty in a multi-project matrix environment: Is organizational conflict inevitable? *International Journal of Project Management*, *26*(8), 773–788.
- Lumsden, P. (1968). *The Line-of-balance Method*. Pergamon Press, Industrial Training Division.
- Lutz, J. D., Halpin, D. W., & Wilson, J. R. (1994). Simulation of Learning Development in Repetitive Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, *120*(4), 753–773.
- Miguel, P. A. C. (2008). Portfolio management and new product development implementation: A case study in a manufacturing firm. *International Journal of Quality & Reliability Management*, *25*(1), 10–23.
- Murray-Webster, R., & Thiry, M. (2000). Project programme management. In J. R. Turner & S. J. Simister (Eds.), *Handbook of project management* (3rd ed.). London: Gower.
- Naybour, P. (2014). Project management – an introduction. Retrieved January 20, 2016, from <https://www.apm.org.uk/blog/project-management-introduction#.U6GdC5RdV8E>
- O'Brien, J. J. (1975). VPM Scheduling for High-rise Buildings. *Journal of the Construction Division*, *101*, 895–905.
- O'Brien, J. J., Kreitzberg, F. C., & Mikes, W. F. (1985). Network Scheduling Variations for Repetitive Work. *Journal of Construction Engineering and Management*, *111*, 105–116.

- Osman, I. (1995). An introduction to meta-heuristics. In C. Wildson & M. Lawrence (Eds.), *Operational Reserach Tutorial Papers Series*. Annual conference OR37, Canterbury.
- Paiva, A. (2012). Criando BUFFERS com apoio MS Project 2013. Retrieved from <http://gerentedeprojeto.net.br/?p=2500>
- Ponsteen, A., & Kusters, R. J. (2015). Classification of human- and automated resource allocation approaches in multi-Project management. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 194, 165–173.
- Project Management Institute. (2004). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*. Newton Square: PMI.
- Reda, R. (1990). RPM: Repetitive Project Modeling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(2), 316–330.
- Reeves, C. (1993). *Modern heuristic technique for combinatorial problems*. Oxford: Blackwell Scientific publications.
- Rudolph, G. (1998). On a multi-objective evolutionary algorithm and its convergence to the pareto set. In *IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'98)* (pp. 511–516). Piscataway, NJ. IEEE.
- Shtub, A., LeBlanc, J. L., & Cai, Z. (1996). Scheduling programs with repetitive projects: A comparison of a simulated annealing, a genetic and a pair-wise swap algorithm. *European Journal of Operational Research*, 88(1), 124–138.
- Söderlund, J., & Tell, F. (2009). The P-form organization and the dynamics of project competence: Project epochs in Asea/ABB, 1950-2000. *International Journal of Project Management*, 27, 101–112.
- Steuer, R. (1986). *Multiple Criteria Optimization, Theory, Computation and Application*. New York: John Wiley & Sons.
- Stradal, O., & Cacha, J. (1982). Time space scheduling method. *Journal of the Construction Division*, 108(3), 445–457.
- Suhail, S., & Neale, R. (1994). CPM/LOB: New methodology to integrate CPM and line of balance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 120(3), 667–684.
- Sutherland, J. (2005). Future of scrum: Parallel pipelining of sprints in complex projects. In *Proceedings - AGILE Confernce 2005* (pp. 90–99).

- Teplitz, C. J., & Amor, J. P. (1998). An Efficient Approximation for Project Composite Learning Curves. *Project Management Journal*, 29(3), 28–42.
- Thomas, H. R., Mathews, C. T., & Ward, J. G. (1986). Learning curve models of construction productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, 112(2), 245–258.
- Turner, J. R. (1999). *The handbook of project-based management* (2nd ed.). Cambridge, UK: McGraw-Hill.
- Veldhuizen, D. A. V., & Lamont, G. B. (1998). Evolutionary computation and convergence to a pareto front. In J. R. Koza, W. Banzhaf, K. Chellapilla, M. Deb, M. Dorigo, D. B. Fogel, ... R. Riolo (Eds.), *Genetic Programming 1998: Proceedings of the Third Annual Conference* (pp. 22–25). San Francisco, CA: Morgan Kaufmann.
- Wright, T. P. (1936). Factors Affecting the Cost of Airplanes. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 3(4), 122–128.
- Xu, S., & Ding, L. (2015). Simulation of the effects of different skill learning pathways in heterogeneous construction crews. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 11(2), 381–397.
- Yelle, L. (1979). The learning curve: Historical review and comprehensive survey. *Decision Sciences*, 10(2), 302–328.
- Zika-Viktorsson, A., Hovmark, S., & Nordqvist, S. (2003). Psychosocial aspects of project work: A comparison between product development and construction projects. *International Journal of Project Management*, 21(8), 563–569.
- Zika-Viktorsson, A., Sundström, P., & Engwall, M. (2006). Project overload: An exploratory study of work and management in multi-project settings. *International Journal of Project Management*, 24(5), 385–394.
- Zitzler, E. (1999). *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications*. Ph. D. Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology of Zurich, Zurich, Switzerland.

