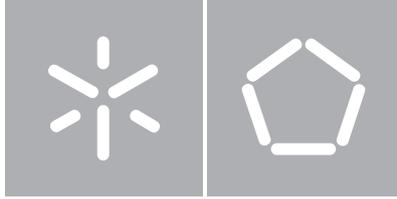




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rui Filipe Soares Moutinho

**Otimização do Custo de Projetos em Redes
de Atividades Multimodais e Estocásticas
com Múltiplos Recursos Renováveis**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rui Filipe Soares Moutinho

**Otimização do Custo de Projetos em Redes
de Atividades Multimodais e Estocásticas
com Múltiplos Recursos Renováveis**

Tese de Mestrado
Mestrado em Informática

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professora Doutora Anabela Pereira Tereso

DECLARAÇÃO

Nome: Rui Filipe Soares Moutinho

Endereço eletrónico: rumout@gmail.com Telemóvel: 969075464

Cartão de Cidadão: 11556024

Título da tese:

Otimização do Custo de Projetos em Redes de Atividades Multimodais e Estocásticas com Múltiplos Recursos Renováveis

Orientação por: Professora Doutora Anabela Pereira Tereso

Ano de Conclusão: 2014

Designação do Mestrado:

Mestrado em Informática

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE

Universidade do Minho, 16/01/2015

Assinatura: _____

Agradecimentos

Agradeço à professora Doutora Anabela Tereso, minha orientadora, por acreditar nas minhas capacidades sem vacilar e estar sempre disponível para atender às minhas dúvidas.

Agradeço à instituição Universidade do Minho e a todos os meus professores por serem vetores do meu próprio desenvolvimento pessoal e profissional.

Grato a todos os meus amigos e família que me ajudaram com o seu tempo e, alguns, com o seu ombro; outros até, com os seus computadores. Em particular, agradeço à minha equipa de voluntários sem a qual não teria sido possível obter tantos resultados com a aplicação desenvolvida.

Ternamente agradecido ao meu pai, à minha mãe, ao meu irmão e à minha afilhada por serem sempre mar na minha areia.

Resumo

Título: Otimização do Custo de Projetos em Redes de Atividades Multimodais e Estocásticas com Múltiplos Recursos Renováveis

Este trabalho enquadra-se em problemas de otimização conhecidos por RCPSP com atividades multimodais sob condições estocásticas.

Uma atividade diz-se multimodal quando o seu tempo de execução varia em função de um conteúdo de trabalho e quantidade de recurso delegada. Por exemplo, se para uma dada atividade estiver estabelecido que necessita de 12 homens por dia, esta pode demorar um dia se usar 12 homens; dois dias se usar apenas seis homens; três dias se usar quatro homens, etc... A natureza estocástica surge quando, na prática, não é possível, com certeza e *a priori*, caracterizar o conteúdo de trabalho aplicável. Nestes casos, recorre-se à aproximação por uma distribuição de probabilidades. No caso em estudo, usa-se a distribuição exponencial.

Dada a relação de precedência das atividades de um projeto, o objetivo é determinar a alocação ótima de recursos às atividades tal que o custo total do projeto seja mínimo, sob condições estocásticas. Este inclui o custo de consumo dos recursos e o custo do eventual atraso na execução do projeto, tendo em conta um prazo predefinido.

Prosseguindo os desenvolvimentos na área, propõe-se um novo modelo de otimização que considera a existência de vários recursos por atividade, renováveis mas sujeitos a restrições de disponibilidade máxima. Uma plataforma computacional foi desenvolvida em Java recorrendo a processos heurísticos em computação paralela e distribuída. Foram efetuados dois conjuntos de experiências num total de 56 projetos e analisados os resultados.

Abstract

Title: Project Cost Optimization in Stochastic Multimodal Activity Networks with Multiple Renewable Resources

This work fits in the realm of project cost optimization problems known as RCPSP with multimodal activities under stochastic conditions.

On a multimodal activity, the execution time varies according to both the work content and the allocated resource quantity. For example, if it is established that one activity requires 12 men per day, then this can be executed in one day if using 12 men; in two days if using only six men; three days in the case of four men, etc... The stochastic nature emerges when it is not possible to characterize, certainly and *a priori*, the applicable work content. Under such circumstances, one resorts to a distribution of probabilities. In the case under study, the exponential distribution is used.

Given the precedence relation of a project activities, the goal is to determine the optimal resources allocation to the activities such that the total project cost is minimized under stochastic conditions. This value includes the cost of resource consumption and the cost of the eventual project execution delay against the predefined due date.

Following the previous developments in the field, a new optimization model considering the existence of multiple resources per activity, renewable yet constrained by maximum availability, is proposed. A computational platform was developed in Java using heuristic methods under concurrent and distributed computation paradigms. Two sets of experiments were conducted for a total amount of 56 projects, and the results analyzed.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	2
2	Revisão Bibliográfica	3
3	Apresentação do Problema	9
3.1	Descrição e Desafios	9
3.2	Metodologia	10
4	Modelação Matemática do Problema	11
5	Construção dos Projetos para Testes	17
5.1	Obtenção dos Projetos	17
5.2	Nomenclatura dos Projetos	19
5.3	Grupo de Projetos MP_Net02	19
6	Implementação Computacional	21
6.1	Decisões Preliminares	21
6.1.1	Método de Escalonamento	22
6.1.2	Método de Alocação	24
6.2	Macra – Plataforma Computacional	25
6.2.1	Implementação das Heurísticas	26
6.2.2	Implementação da Otimização	26
6.2.3	Computação Paralela	31
6.2.4	Processamento de Dados de Entrada	31
6.3	Macra Aethra – Interface Gráfica	32
6.3.1	aethra.cp – Aplicação Administrativa	32
6.3.2	aethra.je – Aplicação Executiva	33
7	Procedimentos e Resultados Experimentais	35
7.1	Procedimentos	35
7.1.1	Configurações dos Algoritmos	35
7.1.2	Execução, Recolha e Processamento	35
7.2	Resultados Experimentais	36

8	Discussão	43
8.1	Desempenho da Implementação Computacional	43
8.2	Análise às Médias dos Resultados	45
8.3	Análise à Distribuição	48
8.4	Considerações Finais	52
9	Conclusões e Trabalho Futuro	53
A	Projetos Testados	61
A.1	Grupo de Projetos MP_Net01	61
A.2	Grupo de Projetos MP_Net02	63
A.3	Grupo de Projetos MP_Net03	64
A.4	Grupo de Projetos MP_Net04	65
A.5	Grupo de Projetos MP_Net05	66
A.6	Grupo de Projetos MP_Net06	68
A.7	Grupo de Projetos MP_Net07	69
A.8	Grupo de Projetos MP_Net08	71
A.9	Grupo de Projetos MP_Net09	72
A.10	Grupo de Projetos MP_Net10	73
A.11	Grupo de Projetos MP_Net11	74
A.12	Grupo de Projetos MP_Net12	76
A.13	Grupo de Projetos MP_Net13	78
A.14	Grupo de Projetos MP_Net14	80
B	Valor Esperado do Máximo de Variáveis Aleatórias Exponencialmente Distribuídas e Independentes	83
C	Listagem de Resultados	85
C.1	Listagem para a $\exp A$	88
C.2	Listagem para a $\exp B$	108

Lista de Tabelas

5.1	Quadro geral dos projetos de teste.	17
5.2	Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net02.	20
5.3	Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net02.	20
7.1	Configurações dos algoritmos usadas nos testes.	35
7.2	Máquinas usadas nos testes, contagem de resultados obtidos e tempos de execução.	36
7.3	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net01.	37
7.4	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net02.	37
8.1	Aspetos morfológicos observáveis nos gráficos de dispersão.	48
8.2	Quadro síntese das observações aos gráficos de dispersão na expA pela configuração DD.	49
8.3	Quadro síntese das observações aos gráficos de dispersão na expB pela configuração DD.	49
8.4	Incidência das observações aos gráficos de dispersão.	50
A.1	Valores dos parâmetros comuns em cada grupo de projetos.	61
A.2	Síntese do grupo de projetos MP_Net01.	62
A.3	Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net01.	62
A.4	Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net01.	62
A.5	Síntese do grupo de projetos MP_Net02.	63
A.6	Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net02.	63
A.7	Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net02.	64
A.8	Síntese do grupo de projetos MP_Net03.	64
A.9	Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net03.	65
A.10	Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net03.	65
A.11	Síntese do grupo de projetos MP_Net04.	65
A.12	Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net04.	66
A.13	Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net04.	66
A.14	Síntese do grupo de projetos MP_Net05.	67
A.15	Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net05.	67
A.16	Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net05.	68
A.17	Síntese do grupo de projetos MP_Net06.	68

A.18	Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net06.	69
A.19	Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net06.	69
A.20	Síntese do grupo de projetos MP_Net07.	69
A.21	Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net07.	70
A.22	Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net07.	70
A.23	Síntese do grupo de projetos MP_Net08.	71
A.24	Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net08.	71
A.25	Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net08.	72
A.26	Síntese do grupo de projetos MP_Net09.	72
A.27	Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net09.	73
A.28	Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net09.	73
A.29	Síntese do grupo de projetos MP_Net10.	73
A.30	Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net10.	74
A.31	Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net10.	74
A.32	Síntese do grupo de projetos MP_Net11.	75
A.33	Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net11.	75
A.34	Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net11.	76
A.35	Síntese do grupo de projetos MP_Net12.	76
A.36	Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net12.	77
A.37	Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net12.	78
A.38	Síntese do grupo de projetos MP_Net13.	78
A.39	Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net13.	79
A.40	Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net13.	80
A.41	Síntese do grupo de projetos MP_Net14.	80
A.42	Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net14.	82
A.43	Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net14.	82
C.1	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net01, na expA.	88
C.2	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_1_5, na configuração DD.	88
C.3	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_2_31, na configuração DD.	88

C.4	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net02, na expA.	89
C.5	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_1_5, na configuração DD.	89
C.6	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_4_3155, na configuração DD.	89
C.7	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net03, na expA.	90
C.8	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net03_1_5, na configuração DD.	90
C.9	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net03_2_15, na configuração DD.	90
C.10	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net04, na expA.	91
C.11	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net04_1_1, na configuração DD.	91
C.12	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net04_2_51, na configuração DD.	91
C.13	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net05, na expA.	92
C.14	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net05_1_1, na configuração DD.	92
C.15	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net05_3_333, na configuração DD.	93
C.16	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net06, na expA.	93
C.17	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net06_1_3, na configuração DD.	94
C.18	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net06_3_531, na configuração DD.	94
C.19	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net07, na expA.	95
C.20	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net07_1_3, na configuração DD.	95
C.21	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net07_4_3555, na configuração DD.	96
C.22	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net08, na expA.	96
C.23	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net08_1_5, na configuração DD.	97
C.24	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net08_3_315, na configuração DD.	97
C.25	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net09, na expA.	98
C.26	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net09_1_3, na configuração DD.	98
C.27	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net09_3_311, na configuração DD.	99
C.28	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net10, na expA.	99
C.29	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net10_1_5, na configuração DD.	100
C.30	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net10_2_33, na configuração DD.	100
C.31	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net11, na expA.	101
C.32	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net11_1_1, na configuração DD.	101
C.33	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net11_4_1155, na configuração DD.	102
C.34	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net12, na expA.	102
C.35	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net12_1_5, na configuração DD.	103
C.36	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net12_2_13, na configuração DD.	103
C.37	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net13, na expA.	104
C.38	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net13_1_1, na configuração DD.	104
C.39	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net13_2_31, na configuração DD.	105
C.40	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net14, na expA.	105
C.41	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net14_1_5, na configuração DD.	106
C.42	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net14_2_31, na configuração DD.	107

C.43	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net01, na expB.	108
C.44	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_1_NAC, na configuração DD.	108
C.45	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_2_NAC, na configuração DD.	108
C.46	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net02, na expB.	109
C.47	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_1_NAC, na configuração DD.	109
C.48	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_4_NAC, na configuração DD.	109
C.49	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net03, na expB.	110
C.50	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net03_1_NAC, na configuração DD.	110
C.51	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net03_2_NAC, na configuração DD.	110
C.52	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net04, na expB.	111
C.53	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net04_1_NAC, na configuração DD.	111
C.54	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net04_2_NAC, na configuração DD.	111
C.55	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net05, na expB.	112
C.56	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net05_1_NAC, na configuração DD.	112
C.57	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net05_3_NAC, na configuração DD.	113
C.58	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net06, na expB.	113
C.59	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net06_1_NAC, na configuração DD.	114
C.60	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net06_3_NAC, na configuração DD.	114
C.61	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net07, na expB.	115
C.62	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net07_1_NAC, na configuração DD.	115
C.63	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net07_4_NAC, na configuração DD.	116
C.64	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net08, na expB.	116
C.65	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net08_1_NAC, na configuração DD.	117
C.66	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net08_3_NAC, na configuração DD.	117
C.67	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net09, na expB.	118
C.68	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net09_1_NAC, na configuração DD.	118
C.69	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net09_3_NAC, na configuração DD.	119
C.70	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net10, na expB.	119
C.71	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net10_1_NAC, na configuração DD.	120
C.72	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net10_2_NAC, na configuração DD.	120
C.73	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net11, na expB.	121
C.74	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net11_1_NAC, na configuração DD.	121
C.75	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net11_4_NAC, na configuração DD.	122
C.76	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net12, na expB.	122
C.77	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net12_1_NAC, na configuração DD.	123
C.78	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net12_2_NAC, na configuração DD.	123
C.79	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net13, na expB.	124
C.80	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net13_1_NAC, na configuração DD.	124
C.81	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net13_2_NAC, na configuração DD.	125

C.82	Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net14, na expB.	125
C.83	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net14_1_NAC, na configuração DD.	126
C.84	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net14_2_NAC, na configuração DD.	127

Lista de Figuras

2.1	Exemplo do impacto da lista de prioridades usada para produzir um escalonamento, num projeto com cinco atividades e apenas um recurso.	3
4.1	Partição finita do tempo contínuo de execução.	12
5.1	Esquema de geração e organização dos projetos de teste.	17
5.2	Nomenclatura de um projeto.	19
5.3	Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net02.	20
6.1	Esquema do algoritmo geral desenvolvido.	22
6.2	Arquitetura geral da plataforma computacional Macra.	25
6.3	Construção de listas de prioridades para um caso exemplo.	27
6.4	Esquema da geração de um novo indivíduo na ES adaptada.	29
6.5	Detalhe do Result Data Inspector.	33
6.6	A janela principal da Simulation Job Executor.	33
7.1	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_1_5, na configuração DD.	38
7.2	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_2_31, na configuração DD.	38
7.3	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_1_NAC, na configuração DD.	39
7.4	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_2_NAC, na configuração DD.	39
7.5	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_1_5, na configuração DD.	40
7.6	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_4_3155, na configuração DD.	40
7.7	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_1_NAC, na configuração DD.	41
7.8	Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_4_NAC, na configuração DD.	41
8.1	Gráficos de barras para os tempos médios de obtenção de um resultado, em milissegundos, por configuração, para cada grupo de projetos testados.	44
8.2	Diagrama de caixa dos intervalos de confiança para as médias, do grupo MP_Net01.	46
8.3	Diagrama de caixa dos intervalos de confiança para as médias, do grupo MP_Net05.	47
8.4	Diagrama de caixa dos intervalos de confiança para as médias, do grupo MP_Net12.	47
8.5	Gráfico de dispersão de resultados para MP_Net03_2_15 obtidos pela configuração DD.	51
8.6	Gráfico de dispersão de resultados para MP_Net13_2_31 obtidos pela configuração DD.	52
A.1	Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net01.	62
A.2	Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net02.	63
A.3	Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net03.	64
A.4	Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net04.	66
A.5	Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net05.	67

A.6	Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net06.	68
A.7	Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net07.	70
A.8	Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net08.	71
A.9	Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net09.	72
A.10	Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net10.	74
A.11	Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net11.	75
A.12	Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net12.	77
A.13	Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net13.	79
A.14	Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net14.	81

Lista de Algoritmos

6.1	Método de escalonamento sequencial com restrições de capacidade máxima de recursos. . .	23
6.2	Método de alocação.	24
6.3	Procedimento de mutação na ES aplicável a permutações.	28

Acrónimos

RCPSP: Resource Constraint Project Scheduling Problem

AoN: Activity-on-Node

AoA: Activity-on-Arc

PD: Programação Dinâmica

EMA: Electromagnetic Algorithm

EVA: Evolutionary Algorithm

EM: Electromagnetism-based Methods

ES: Evolution Strategies

UDC: Uniformly Directed Cutset

expA: Experiência A

expB: Experiência B

CP: Critical Path

API: Application Programming Interface

p-EVA: EVA adaptado a Permutações

DD: Default-Default

LL: Light-Light

DL: Default-Light

LD: Light-Default

GC: Garbage Collector

JVM: Java Virtual Machine

1. Introdução

Esta investigação enquadra-se num ramo de estudo do RCPS (Resource Constraint Project Scheduling Problem¹). Entende-se, em traços gerais, um projeto como um conjunto de atividades sujeitas a regras de precedências e munidas de recursos. Da execução completa de todas as atividades, resulta o produto do projeto. O RCPS trata o problema de escalonar as várias atividades, atendendo ao condicionamento induzido pelos recursos, de modo a minimizar custos ou tempo total de execução.

Em particular, este trabalho incide sobre a minimização do custo total de projetos cujas atividades são multimodais em contexto estocástico. O custo total contempla custos associados a atrasos de execução (do projeto) tendo em conta um prazo predefinido e, por isso, o objetivo implica também encontrar o melhor escalonamento na conjuntura existente; eventualmente, o que assegure menor tempo total.

Uma atividade necessita de recursos para a sua execução. Diz-se multimodal quando o tempo de execução é determinado em função da quantidade de recurso atribuída em associação a um conteúdo de trabalho. Por exemplo, supondo um conteúdo de trabalho de 12 unidades de recurso por dia, a atividade pode demorar seis dias se requisitar apenas duas unidades ou demorar meio dia se lhe tiverem sido atribuídas 24 unidades. Na prática, haverá limites na quantidade de recurso a atribuir. Nesse aspeto, e ainda no exemplo anterior, se apenas for possível alocar pacotes de três ou seis unidades; então a atividade suportará dois cenários: demorar quatro dias (com três unidades) ou dois dias (com seis unidades). Assim, cada uma daquelas possibilidades constitui o que se denomina de modo.

O caráter estocástico surge quando não é possível caracterizar o conteúdo de trabalho, *a priori*. Nomeadamente, quando a informação sobre as atividades é incompleta na fase de planeamento do projeto ou porque está sujeita a fatores subjetivos. Nestas situações, recorre-se à atribuição de uma distribuição de probabilidades. Portanto, dependendo da distribuição, os modos podem ser em número indeterminado ou ocorrerem associados a uma probabilidade.

As atividades de um mesmo projeto obedecem a uma relação de precedências, isto é, cada uma só pode iniciar quando todas das quais depende estiverem concluídas. É comum usar-se duas notações gráficas para representar aquela relação:

AoN (Activity-on-Node²): um grafo orientado cujos nodos representam as atividades e os arcos a relação. Uma atividade (nodo) só pode iniciar quando estiverem concluídas todas as atividades (nodos) com arcos a terminar nela.

As atividades iniciais são facilmente identificadas como os nodos com grau de entrada zero. E, os nodos com grau de saída zero, representam as atividades finais;

AoA (Activity-on-Arc³): um grafo orientado cujos arcos representam as atividades. Neste caso, os nodos funcionam como pontos de controlo, ou estados, para aferir a relação: uma atividade (arco) só pode iniciar quando todas as atividades (arcos) que terminam no seu nodo de origem estiverem concluídas.

Esta representação induz a existência de um e um só nodo com grau de entrada zero, a partir do qual os arcos

¹Problema de Escalonamento de Projetos com Restrição de Recursos

²Atividades nos Nodos

³Atividades nos Arcos

representantes das atividades iniciais começam; e um e um só nodo com grau de saída zero, no qual todos os arcos representantes das atividades finais terminam.

A relação de precedências não admite ciclos nem que uma atividade dependa de si mesma. Ao conjunto de todas as atividades imediatamente dependentes de outra, diz-se o conjunto das sucessoras dessa outra. Similarmente, as antecessoras (ou predecessoras) de uma atividade são todas aquelas cujo término permite imediatamente o início daquela atividade.

1.1 Motivação

Inicialmente, Tereso (2002) propõe um modelo estocástico que admite apenas um único recurso (no projeto) que é renovável e de disponibilidade infinita. Uma primeira implementação computacional recorre à PD (Programação Dinâmica) (Tereso et al., 2004a) e outra a um algoritmo de aproximação global – EMA (Electromagnetic Algorithm⁴) – (Tereso et al., 2004b), ambos programados em Matlab com resultados satisfatórios. Subsequentemente, uma melhoria no desempenho computacional foi conseguida através da migração daquelas realizações para Java (Tereso et al., 2006; Tereso, Novais, Araújo e Elmaghraby, 2009), com destaque para o método heurístico. Esse desempenho motiva a adaptação de outra heurística – o EVA (Evolutionary Algorithm⁵) – ao mesmo modelo (Tereso et al., 2007).

Num segundo momento, incrementa-se a complexidade do modelo ao permitir projetos com múltiplos recursos (Moutinho, 2007). Todas as restantes assumpções do anterior são herdadas; nomeadamente, os recursos continuam a ser renováveis e de infinita capacidade. Os três métodos – PD, EMA e EVA – foram aplicados ao novo problema. A PD mostrou-se muito ineficiente quando comparada com as abordagens de aproximação global.

O presente trabalho continua aquela linha de investigação ao propor um novo modelo no qual os projetos têm múltiplos recursos renováveis mas de capacidade máxima limitada.

1.2 Objetivos

Pretende-se formular um modelo matemático da família dos RCPSP que minimize o custo total de projetos cujas atividades são multimodais em contexto estocástico podendo usar um conjunto não vazio de recursos de disponibilidade total limitada. Este modelo deverá ser implementado em Java recorrendo aos três métodos: PD, EMA e EVA.

No universo de recursos de disponibilidade limitada, importa distinguir três cenários quanto à sua capacidade de renovação: *não renovável* quando qualquer quantidade usada nunca é repostada; *parcialmente renovável* quando a reposição exista mas não seja completa ou seja possível apenas um número predefinido de vezes; *totalmente renovável* onde qualquer quantidade reclamada durante a utilização do recurso é repostada, na totalidade, assim que essa necessidade cesse. Este trabalho considera, apenas, recursos totalmente renováveis.

Em termos computacionais, deve ser feito um estudo prévio sobre a viabilidade de cada um dos métodos propostos. Complementarmente, paradigmas de programação paralela e distribuída deverão ser explorados.

⁴Algoritmo Eletromagnético

⁵Algoritmo Evolucionário

2. Revisão Bibliográfica

A gestão de projetos é uma área abrangente que engloba, em particular, o planeamento de projetos. Um passo importante nessa fase de um projeto consiste no escalonamento das suas atividades constituintes. Este campo de estudo é fértil em literatura e em métodos. Já Johnson (1954) sugeria metodologia de escalonamento sob dois ou três estados operantes onde cada transição de estado é conseguida por regras de precedência. Aqueles conceitos de estado estão próximos do que agora se chama de atividade num projeto.

O RCPS (Resource Constraint Project Scheduling Problem) envolve escalonamento de atividades respeitando não só as restrições de precedências como os requisitos de recursos (Demeulemeester e Herroelen, 2002). Engloba uma classe vasta de problemas que usualmente procuram determinar um processo ótimo de minimização do tempo total de execução de um projeto. Quando as durações das atividades dependem de quantidades de recurso, os problemas consistem, normalmente, em minimizar o custo total e o tempo de execução.

Um método simples de escalonamento de atividades recorre às chamadas listas de prioridades. Estas estruturas representam ordenações possíveis das atividades em conformidade com as restrições aplicáveis, usualmente as regras de precedências. O procedimento consiste em, sequencialmente, recolher cada atividade pela lista de prioridades e escaloná-la no primeiro instante capaz de suportar o seu modo (quantidade de recurso). Atente-se o exemplo na figura 2.1 onde estão representados dois escalonamentos diferentes nas mesmas condições, mas orientados por diferentes ordenações. Da esquerda para a direita e de baixo para

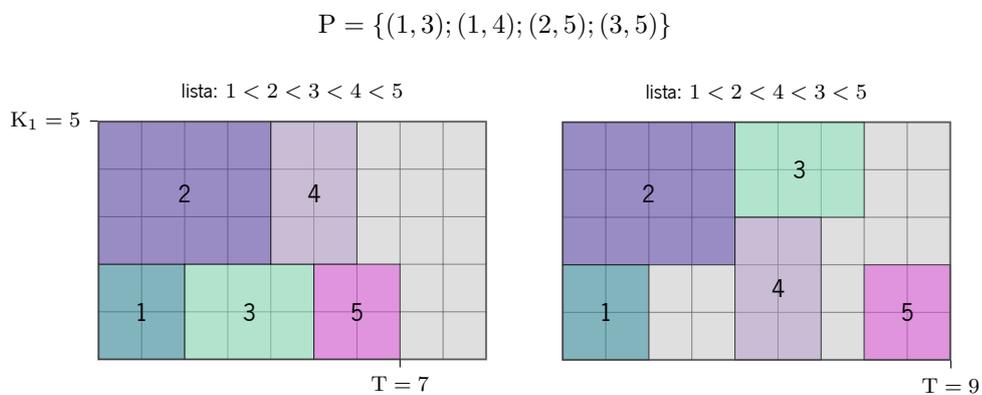


Figura 2.1: Exemplo do impacto da lista de prioridades usada para produzir um escalonamento, num projeto com cinco atividades, apenas um recurso e relação de precedências P .

cima, cada retângulo exterior marca dois eixos: no horizontal, o tempo de execução do projeto; e a quantidade alocada de recurso, no vertical. Assim, cada bloco interior representa uma atividade: a duração de execução e a quantidade atribuída. Entre as listas usadas apenas é trocada a ordem entre as atividades 3 e 4. No entanto, a diferença no tempo total de execução é notória, pelo que este processo sequencial, apesar de simples, é muito dependente da escolha da lista de prioridades.

Têm sido desenvolvidas várias estratégias para a resolução de RCPS. De modo geral, podem agrupar-se em dois grupos: métodos de enumeração e métodos heurísticos.

Métodos de Enumeração

Os métodos baseados em enumeração percorrem os vários casos possíveis nas variáveis de decisão do problema. Claramente, a eficiência destes processos depende do número total de casos a analisar.

Os *Branch & Bound* evitam a enumeração completa ao identificarem limites inferiores e superiores de certas características do problema (Sprecher et al., 1994, 1997). Além destes limites, são usadas regras de dominância que permitem decidir, o mais cedo possível, qual o caminho a seguir em cada nó de decisão (conforme se percorra a árvore de enumeração). Dotados de tais estruturas, são processos tipicamente associados a cenários discretos e determinísticos e permitem encontrar o valor ótimo da função objetivo.

Apesar da sua maior complexidade, a eficiência dos *Branch & Bound* é tanto melhor quanto a escolha ou aplicabilidade daqueles limites e regras de dominância. São processos amplamente adotados, sendo que têm provado, ainda, ser métodos flexíveis capazes de abordar problemas estocásticos (Stork, 2000).

Métodos Heurísticos

Com o advento de maior capacidade de computação, surgem métodos marcadamente mais aleatórios e iterativos. Nestes casos, em vez da enumeração, há um método de busca pela melhor solução através de convergência de vários cenários intervenientes ou analisados.

Há propostas que visam métodos preditivos ou reativos na busca do escalonamento ótimo, nomeadamente através de regras de prioridade e dominância capazes de responder às especificidades das estratégias heurísticas (Boctor, 1993, 1996; Tsai e Gemmill, 1998; Buddhakulsomsiri e Kim, 2007).

Outros processos não lidam diretamente com o tema do RCPS, mas podem ser usados como ferramentas depois de feita uma representação passível de ser por eles executada – métodos de otimização global. Em termos matemáticos, tais métodos procuram determinar o objeto cuja imagem, por uma dada função, é o extremo global. Usualmente, quer-se obter o objeto cuja imagem é mínima. Em traços gerais, esses algoritmos recorrem a:

População: há um conjunto de soluções candidatas codificadas como pontos no domínio (da função). A população inicial é gerada de forma aleatória mas de modo a se garantir a validade de cada instância.

Iteração: a busca da melhor solução é feita sobre a população atual. Tal processo implica a avaliação da imagem que cada solução candidata (ponto da população) representa segundo a função objetivo. Com base nessa recolha, uma nova população é gerada. Para a nova população, as soluções candidatas são alteradas localmente segundo um mecanismo aleatório, mas de tal forma a favorecer aquelas que representam as melhores imagens da função objetivo.

Paragem: o processo para conforme um conjunto de condições, como por exemplo, um valor máximo de iterações. Estas condições de paragem são próprias de cada processo de otimização global e são estabelecidas de acordo com critérios de satisfação para a busca da solução ótima. No final, o processo devolve a melhor solução candidata existente na última população.

Os métodos de otimização global oferecem processos simples que são aplicáveis mesmo em casos onde a função objetivo é complexa. Porém, por serem métodos heurísticos (de busca iterativa em passos com aleatoriedade), a solução obtida não é garantida como sendo a ótima mas um valor sub-ótimo (aproximado).

Assim, é importante recorrer a métodos cujas características sejam as mais adequadas à especificidade de cada problema.

No contexto particular do presente trabalho, dois conjuntos de métodos de otimização global capacitados à minimização de funções de múltiplas variáveis, são estudados: os EM e as ES.

EM (Electromagnetism-based Methods¹)

Estes métodos foram introduzidos por Birbil e Fang (2003) e baseiam-se nas leis de atração/repulsão de eletromagnetismo entre partículas carregadas num sistema fechado.

Cada partícula é representada por um ponto num hiperespaço que constitui o domínio das variáveis de decisão. Cada um desses pontos mapeia, através das coordenadas, uma possível instância para o conjunto daquelas variáveis – uma solução candidata. A cada partícula está associada uma carga elétrica – q^i – que traduz o valor imagem pela função objetivo das coordenadas respetivas – $f(x^i)$:

$$q^i = \exp \left[-n \frac{f(x^i) - f(\hat{x})}{\sum_{k=1}^m (f(x^k) - f(\hat{x}))} \right] \quad (2.1)$$

onde n é o número de variáveis de decisão, m é o número de partículas do sistema e $f(\hat{x})$ é o menor valor da função objetivo verificado entre as partículas. A determinação da carga é feita de forma a induzir maior atração entre as melhores partículas. Para isso, a força resultante a aplicar a cada partícula – F^i – é calculada:

$$F^i = \sum_{j \in \{1, \dots, m\} \setminus \{i\}} \left(\delta_{i,j} \times (x^j - x^i) \frac{q^i q^j}{\|x^j - x^i\|^2} \right) \quad \text{onde } \delta_{i,j} = \begin{cases} 1 & f(x^j) < f(x^i) \\ -1 & f(x^j) \geq f(x^i) \end{cases} \quad (2.2)$$

O cálculo das forças permite que uma partícula i seja atraída para outra melhor j (caso $\delta_{i,j} = 1$), seguindo um sentido de x^i para x^j . Da mesma forma, no caso contrário, a partícula é repelida. Assim, em cada iteração, os pontos são atraídos entre si pelos que estão mais perto da solução ótima e repelidos pelos que estão mais afastados. A aplicação da força resultante é feita com uma intensidade aleatória normalizada, isto é, maior que 0 (sem movimento) e não superior a 1 (movimento segundo o comprimento total) para que os pontos possam visitar zonas novas do domínio.

O EM original apresenta boas propriedades de convergência à solução (sub-)ótima (Birbil et al., 2004), sobretudo depois de inserido um fator de perturbação associado à pior partícula, em cada iteração. Contudo, a sua aplicabilidade está orientada para funções reais contínuas de variáveis reais.

Uma versão discreta binária do EM foi adaptada da original por Javadian et al. (2008). Esta especificação suporta variáveis de decisão binárias, pelo que cada coordenada, nos pontos/partículas, aceita apenas o valor 0 ou 1. Por conseguinte, as forças eletromagnéticas são aplicadas de forma a moverem cada partícula apenas um passo discreto, por cada iteração; isto é, dependendo da força (resultante da interação de atração/repulsão) aplicada numa partícula, uma coordenada muda o seu valor, movendo o ponto.

¹Métodos baseados em Eletromagnetismo

ES (Evolution Strategies²)

Costa (2003) descreve estratégias evolutivas. São métodos que simulam pressão evolutiva por seleção sobre populações de indivíduos.

Nestes processos, um indivíduo constitui-se pelo vetor cujas coordenadas representam possíveis valores para as variáveis de decisão e por um vetor homólogo contendo desvios-padrão. A cada iteração, uma nova população de indivíduos é obtida da anterior em duas fases: descendência e seleção. Uma vez gerados os descendentes, ocorre a ordenação dos indivíduos pelos valores da função objetivo correspondentes. Uma vez ordenados, são selecionados os melhores para constituírem a nova população. Deste modo, geração após geração, os valores suportados por cada solução candidata (um indivíduo) convergem para a solução final (sub-ótima). Tal solução obtém-se pelo melhor indivíduo da última população/geração.

A geração de descendência envolve três operações: recombinação, adaptação e mutação. Dado o caráter mais complexo desta fase essencial das ES, importa realçar cada uma daquelas operações:

Recombinação: Num primeiro momento, um novo indivíduo é obtido através de vários indivíduos da população atual. Esta operação pode ser aplicada a ambos os vetores (de decisão e de desvios-padrão) como apenas a um deles. O processo consiste em obter as novas coordenadas pelas dos vetores homólogos nos indivíduos intervenientes (progenitores). Há, fundamentalmente, dois tipos de recombinação: intermédia e discreta.

A recombinação intermédia obtém cada coordenada pela média das homólogas nos progenitores. Por outro lado, na recombinação discreta, cada coordenada é cópia da sua homóloga de um dos progenitores, escolhido ao acaso pela distribuição uniforme.

Adaptação: Este processo visa apenas os desvios-padrão e introduz uma pequena variabilidade local ao afetar cada componente com um fator aleatório, normalmente distribuído. Também esta operação se distingue entre duas variantes: isotrópica e não isotrópica.

Na adaptação isotrópica, há uma variância comum à população, seja σ^2 . Essa variância é atualizada para a geração seguinte (atual descendência) – σ_*^2 – por:

$$\sigma_* = \sigma e^z, \quad z \sim N(0, \Delta\sigma^2) \quad (2.3)$$

onde $\Delta\sigma$ é parâmetro do algoritmo, usualmente, igual a $1/\sqrt{n}$ com n o número de variáveis de decisão.

A adaptação não isotrópica permite adaptar um desvio-padrão σ_i para cada variável de decisão. Assim, cada um daqueles valores, num descendente, é atualizado (σ_{i*}) como:

$$\sigma_{i*} = \sigma_i e^{z_i} e^z, \quad z_i \sim N(0, \Delta\sigma^2), \quad z \sim N(0, \Delta\bar{\sigma}^2) \quad (2.4)$$

onde os parâmetros $\Delta\sigma$ e $\Delta\bar{\sigma}$ são comumente fixados em $1/\sqrt{2\sqrt{n}}$ e $1/\sqrt{2n}$, respetivamente.

Mutação: Depois de recombinação e adaptação, a mutação consiste em adicionar (pequenas) quantidades aleatórias $\delta_i \sim N(0, \sigma_i)$ a cada componente do vetor de variáveis de decisão. Note-se que quando se usa adaptação isotrópica, aqueles σ_i serão todos idênticos, isto é $\forall i, j, \sigma_i = \sigma_j$; porém, os δ_i continuam a poder ser diferentes.

²Estratégias Evolutivas

É fácil entender, pela forma como a mutação se processa, que as ES, tal como o EM original, estão orientadas para funções reais contínuas de variáveis reais. Contudo, a existência de vários métodos de recombinação e adaptação torna as ES mais flexíveis.

Trabalhos Anteriores

Em Tereso (2002) o RCPSP estocástico com atividades multimodais é introduzido. O método de solução consiste em aplicar PD (Programação Dinâmica) sobre estágios obtidos dos UDC (Uniformly Directed Cutset) da rede AoA (Activity-on-Arc) das atividades.

Aquele modelo foi estendido a múltiplos recursos. Nessa nova especificação, surge o problema em assegurar que durações de utilização de cada recurso, na mesma atividade, sejam, em valor esperado, idênticas. Foram abordadas estratégias de alocação de recursos orientadas pelas quantidades (Tereso, Araújo, Moutinho e Elmaghraby, 2009b) e outras orientadas pelas durações (Tereso, Araújo, Moutinho e Elmaghraby, 2009a). Por serem computacionalmente exigentes, desenvolveu-se uma terceira estratégia (Tereso et al., 2008) que traduz a diferença entre as durações de utilização como manutenção, induzindo uma nova parcela no custo total: o custo de manutenção.

3. Apresentação do Problema

A presente investigação trata de um problema de minimização. O trabalho consiste em criar um novo modelo matemático e desenvolver uma sua implementação computacional.

3.1 Descrição e Desafios

Pretende-se obter o custo total e tempo de execução mínimos de um projeto.

Um projeto consiste em dois conjuntos: um de recursos e outro de atividades. As atividades estão sujeitas a uma relação de precedência bem determinada: cada uma só pode ser iniciada assim que todas as que lhe precedem tenham terminado; e, uma vez iniciada, não pode ser interrompida. Cada atividade usa um subconjunto não vazio de recursos (1 ou mais) e o seu tempo de execução é variável em função da quantidade atribuída a cada um desses recursos requeridos, ponderada por um fator estocástico – conteúdo de trabalho caracterizado por uma distribuição exponencial. A disponibilidade máxima de cada recurso, em cada instante, tem limite mas cada quantidade reclamada por uma atividade é, imediatamente, reposta na totalidade aquando do término desta.

O custo total de execução de um projeto resulta do somatório de:

Custo de quantidade: associado à quantidade requerida por todos os recursos em todas as atividades, no decorrer do projeto;

Custo de desvio: associado ao atraso que a execução total do projeto tem em relação a um prazo pré-determinado;

Bónus: um custo negativo aplicado se o projeto terminar antes do prazo.

O tempo total de execução depende do escalonamento das atividades. Além das precedências, as restrições de disponibilidade irão condicionar o arranjo das atividades. Sempre que haja concorrência entre atividades a requerer alguns recursos em comum, haverá competição pelas quantidades a alocar dentro da capacidade total. A satisfação de todas as restrições irá potenciar atrasos no início de algumas atividades.

Este problema lida com restrições que interferem entre si, num contexto estocástico. O facto de se usar a distribuição exponencial para caracterizar os conteúdos de trabalho implica, por ser contínua, que o número de modos que uma atividade admite não é finito. Isso implica que qualquer atividade poderá ter qualquer duração possível associada a uma probabilidade de ocorrência. Esta característica é herdada do modelo de múltiplos recursos anterior (Moutinho, 2007). Porém, a conjugação daquela característica com a limitação de disponibilidade, acresce à complexidade no sentido em que não será possível estabelecer *a priori* cenários no escalonamento de atividades concorrentes em competição pelos mesmos recursos.

Outros trabalhos têm sido desenvolvidos com modelos de múltiplos recursos em contexto estocástico (Bruni et al., 2011; Deblaere et al., 2011). Apesar de explorarem estratégias proativas que permitem um grau de antecipação de cenários no escalonamento, apenas consideram as atividades com um único modo e a natureza estocástica é aplicada diretamente na caracterização das durações. Além disso, o objetivo principal é minimizar o tempo total de execução do projeto.

O presente trabalho, contribui com um método que procura minimizar não só a duração do projeto como o custo associado à alocação de recursos a atividades multimodais e onde a caracterização estocástica permite qualquer duração positiva, com um grau de probabilidade.

3.2 Metodologia

Em linhas gerais, procede-se em três fases: modelação matemática do problema; construção de uma plataforma computacional que implemente o modelo; experiências/análise.

O modelo será formulado de forma independente da implementação computacional. Aquele apenas responderá matematicamente ao problema ao clarificar as variáveis de decisão e restrições aplicáveis sem antecipar estruturas mais adequadas a determinados algoritmos específicos.

Na fase de implementação, face ao modelo criado, serão estudadas as adaptações necessárias ao uso de programação dinâmica e os algoritmos de otimização global. Depois de determinada a melhor estratégia, uma plataforma será desenvolvida em Java suportando os diversos algoritmos e suas parametrizações, conforme aplicável.

A fase das experiências e análise tenta responder não só a questões como eficiência e eficácia da plataforma computacional mas também aferir o comportamento do modelo quando aplicado a diversos problemas. Em particular, pretende-se observar a influência de três fatores: multiplicidade de recursos; restrição de disponibilidade (de cada recurso) e configuração dos algoritmos.

Foram preparadas duas experiências, cada uma com 28 projetos: expA (Experiência A) e expB (Experiência B). A expA incide nos testes ao novo modelo, pelo que os projetos contêm as restrições de disponibilidade (à quantidade máxima alocada de cada recurso). Na expB, pelo contrário, aquelas restrições não são impostas, funcionando como grupo de controlo àquele fator. Em ambas as experiências, os projetos testados estão divididos em dois grupos: 14 com um único recurso e 14 com múltiplos recursos. A construção dos projetos testados está detalhada no capítulo 5 na página 17.

Quer a expA quer a expB foram executadas com várias configurações dos algoritmos implementados, seguindo procedimentos descritos na secção 7.1 na página 35, recorrendo a várias sessões de simulações em diversas máquinas disponibilizadas por voluntários, em uso doméstico.

4. Modelação Matemática do Problema

Neste capítulo, faz-se uma apresentação do novo modelo matemático, por construção adaptada de Moutinho e Tereso (2014).

Formalização de Projeto

Em termos formais, um projeto é constituído por:

$A \in \mathbf{IN}$ um total de A atividades,

$P \subset \mathbf{IN} \times \mathbf{IN}$ o conjunto imagem da relação de precedências das atividades:

$$\forall a, b \in \{1, \dots, A\}, (a, b) \in P \Leftrightarrow a \text{ precede } b$$

$R \in \mathbf{IN}$ um total de R recursos, referenciados sobre $\{1, \dots, R\}$;

$K_r \in \mathbf{IR}^+$ disponibilidade máxima do recurso r ;

$[\ell_{a,r}, u_{a,r}] \subset]0, K_r]$ quantidades de alocação admissíveis de recurso r para a atividade a ;

$W_{a,r} \in \mathbf{IR}^+$ o conteúdo de trabalho associado ao recurso r para a atividade a ;

$c_r \in \mathbf{IR}^+$ custo unitário de alocação do recurso r ;

$i_r \in \mathbf{IR}^+$ custo unitário de manutenção;

$\tau \in \mathbf{IR}^+$ unidade de tempo;

$T_D \in \mathbf{IN}$ prazo de execução (unidades de τ);

$c_L \in \mathbf{IR}_0^+$ custo do atraso por unidade de tempo gasta além do prazo;

$c_E \in \mathbf{IR}_0^+$ bónus a aplicar por unidade de tempo adiantada ao prazo.

Cada atividade necessita de um subconjunto não vazio dos recursos do projeto:

$$\forall a \in \{1, \dots, A\}, 1 \leq \sum_{r=1}^R \delta(a, r) \leq R \quad (4.1)$$

onde δ é a função definida por:

$$\delta(a, r) = \begin{cases} 1 & \text{se atividade } a \text{ necessita de } r \\ 0 & \text{outros casos} \end{cases}, \forall a \in \{1, \dots, A\}, r \in \{1, \dots, R\} \quad (4.2)$$

Medição do Tempo

O tempo (de execução) absoluto é medido sobre uma partição numerável de intervalos de igual comprimento τ . Este método simplifica o modelo ao limitar os instantes possíveis para início das atividades, sendo mais fácil antecipar períodos livres enquanto se mantém um controlo bem determinado sobre a disponibilidade de cada recurso a cada instante. Apesar dessa simplificação, o modelo não deixa de ser aplicável a cenários realistas. Por exemplo, se a utilização de um camião (um recurso) fosse taxada ao dia (unidade de tempo), então mesmo sendo requisitado por 2.5 dias, a totalidade dos 3 (unidades) seria cobrada.

Admite-se que num projeto com vários recursos, a decisão sobre tal unidade de tempo não seja trivial pois

vários recursos podem ser taxados com base em unidades diferentes ou nem estarem associados diretamente ao tempo. Por esse motivo, o modelo abstrai-se ao aceitar aquela unidade de tempo como parâmetro próprio do projeto. Cada período temporal será referenciado pelo seu índice com base zero. A figura 4.1 clarifica esta caracterização.

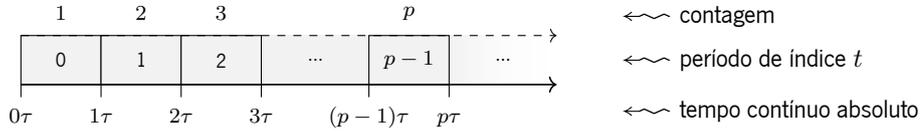


Figura 4.1: Partição finita do tempo contínuo de execução (adaptado de Moutinho e Tereso (2014)).

Caráter Estocástico

Associa-se um conteúdo de trabalho estocástico a cada recurso necessário em cada atividade. Em continuidade com investigações anteriores, mantém-se a caracterização através da distribuição exponencial com parâmetros pré-definidos $\lambda_{a,r}$:

$$\forall a \in \{1, \dots, A\}, r \in \{1, \dots, R\}, \delta(a, r) = 1 \Rightarrow W_{a,r} \sim \text{Exp}(\lambda_{a,r}) \quad (4.3)$$

Este conteúdo de trabalho interfere nas durações de execução das atividades bem como nos custos associados à alocação de cada recurso.

Duração de Execução de uma Atividade

As atividades são multimodais pelo que a sua duração será sensível à quantidade de recurso que lhe for alocada. Designa-se por X a tabela de alocação do projeto:

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,R} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{A,1} & \cdots & x_{A,R} \end{bmatrix} \begin{matrix} \leftarrow x_1 \\ \vdots \\ \leftarrow x_A \end{matrix} \quad (4.4)$$

Cada linha x_a da tabela é o vetor de alocação de cada atividade e $x_{a,r} \in \mathbb{R}$ é a quantidade atribuída a a do recurso r .

Para um $x_{a,r}$, a duração de uma atividade $a \in \{1, \dots, A\}$ devida à utilização de um recurso $r \in \{1, \dots, R\}$ denomina-se por $Y_{a,r}$ e é determinada pesando o conteúdo de trabalho $W_{a,r}$ com a quantidade atribuída, em unidades de τ :

$$Y_{a,r} = \begin{cases} \left\lceil \frac{\mathcal{Y}(a,r)}{\tau} \right\rceil & \Leftarrow \delta(a, r) = 1 \\ 0 & \Leftarrow \delta(a, r) = 0 \end{cases} \quad \text{com } \mathcal{Y}(a, r) = \frac{W_{a,r}}{x_{a,r}} \quad (4.5)$$

onde $\lceil n \rceil = \min\{z \in \mathbb{N} \mid z \geq n\}$. Ou seja, a duração $Y_{a,r}$ é o primeiro natural que multiplicado por τ obtém um valor igual ou maior que a duração real obtida como $\mathcal{Y}(a, r)$. Este processo é necessário para adequar as durações à partição do tempo, conforme discutido anteriormente. Por exemplo, supondo $\mathcal{Y}(a, r) = 2.3$ e

$\tau = 2$, então como $\frac{2.3}{2} = 1.15$, temos $Y_{a,r} = 2$ dado que $2 \times \tau = 4$ é o primeiro natural igual ou superior a 2.3.

Considerando as definições anteriores, Y_a é a duração de execução de uma atividade a avaliada como:

$$Y_a = \max_{r=1}^R Y_{a,r} \quad (4.6)$$

Conforme discutido em Moutinho (2007), tal definição de duração permite disparidade entre cada recurso em termos do tempo total de utilização. Uma vez que cada quantidade de recurso requisitada permanece afeta à atividade até ao fim (clarificado abaixo), importa evitar inatividade. Assim, é desejável que as durações de utilização sejam todas iguais; ou, tenham valores esperados iguais, dado tratar-se de variáveis aleatórias:

$$\forall r, m \in \{1, \dots, R\}, a \in \{1, \dots, A\}, \mathcal{E}[Y_{a,r}] = \mathcal{E}[Y_{a,m}] \quad (4.7)$$

Escalonamento

Seja $t \in \mathbb{N}_0$ um período do tempo de execução do projeto. Considere-se as variáveis binárias $s_{a,t}$:

$$s_{a,t} = \begin{cases} 1 & \text{se } a \text{ começa em } t \\ 0 & \text{outros casos} \end{cases}, a \in \{1, \dots, A\} \quad (4.8)$$

Não se admite que uma atividade possa suspender e retomar a sua execução, pelo que se impõe:

$$\forall a \in \{1, \dots, A\}, \sum_{t \geq 0} (s_{a,t}) = 1 \quad (4.9)$$

Assim, o instante onde certa atividade a começa é calculado como:

$$s_a = t \Leftrightarrow s_{a,t} = 1 \quad (4.10)$$

O vetor S constitui um escalonamento ao incluir os instantes de início de execução de todas as atividades:

$$S = (s_1, \dots, s_A) \quad (4.11)$$

Qualquer escalonamento S deverá respeitar a relação de precedência:

$$\forall (a, b) \in P, s_a + Y_a \leq s_b \quad (4.12)$$

Recursos Renováveis e Limitados

O contributo maior deste modelo está no carácter limitado (em disponibilidade máxima) mas renovável de cada recurso. Para se formalizar esse aspeto é preciso garantir, para todos os instantes de tempo:

Alocação e Reposição: As quantidades apenas podem ser alocadas a uma atividade assim que inicie. Durante a sua execução são mantidas e, assim que cesse, são imediata e completamente repostas:

$$\forall a \in \{1, \dots, A\}, r \in \{1, \dots, R\}, t \geq 0, x_{a,r} = 0 \Leftrightarrow (t < s_a \vee t \geq s_a + Y_a) \quad (4.13)$$

Limites Admissíveis: Durante a execução (e apenas aí) de uma atividade, os limites admissíveis de alocação devem ser respeitados:

$$\forall a \in \{1, \dots, A\}, r \in \{1, \dots, R\}, t \geq 0, \\ (\delta(a,r) = 1 \wedge s_a \leq t < s_a + Y_a) \Rightarrow 0 < \ell_{a,r} \leq x_{a,r} \leq u_{a,r} \leq K_r \quad (4.14)$$

Máxima Disponibilidade: A cada instante, X deve estar válida de acordo com as disponibilidades máximas:

$$\forall t \geq 0, r \in \{1, \dots, R\}, \sum_{a=1}^A x_{a,r} \leq K_r \quad (4.15)$$

Custo Total do Projeto

A alocação de certa quantidade do recurso r a uma atividade a incorre num custo $Q_{a,r}$ e a soma desses valores, para todos os recursos, resulta no custo de alocação para a atividade $a - Q_a$:

$$Q_{a,r} = c_r \cdot W_{a,r} \cdot x_{a,r} \quad Q_a = \sum_{r=1}^R Q_{a,r} \quad (4.16)$$

Para induzir o objetivo descrito em (4.7) na página anterior, segue-se a mesma estratégia usada nesse sentido em Moutinho (2007). Aplica-se à diferença observada, dos tempos de utilização, uma taxa de inatividade ou manutenção. Este valor é próprio de cada recurso e inspira-se nos custos associados à manutenção do recurso mesmo quando não utilizado. Portanto, definem-se os custos:

$$I_{a,r} = i_r (Y_a - Y_{a,r}) \quad I_a = \sum_{r=1}^R I_{a,r} \quad (4.17)$$

Para todo o projeto, os custos totais associados à alocação de recursos são:

$$C_Q = \sum_{a=1}^A Q_a \quad C_I = \sum_{a=1}^A I_a \quad (4.18)$$

Por fim, determina-se o custo relativo ao tempo total de execução do projeto C_{ET} . Aplica-se uma penalização ou um bônus, diretamente proporcionais à diferença, conforme se atrase ou se adiante o projeto tendo em conta

o T_D :

$$C_{ET} = (T - T_D) \times \begin{cases} c_E & T \leq T_D \\ c_L & T > T_D \end{cases} \quad (4.19)$$

onde

$$T = \max_{a=1}^A (s_a + Y_a) \quad (4.20)$$

O custo total do projeto C é a soma dos custos associados à alocação e ao tempo de execução:

$$C = C_Q + C_I + C_{ET} \quad (4.21)$$

Função Objetivo

A tabela de alocação X e o vetor de escalonamento S constituem as variáveis de decisão. Dadas as definições e restrições acima descritas, quer-se obter X e S tais que minimizam o valor esperado do custo total do projeto:

$$\text{minimize } \mathcal{E} [C_Q + C_I + C_{ET}] \quad (4.22)$$

5. Construção dos Projetos para Testes

Em Moutinho (2007), um total de 28 projetos foram testados, distribuídos em 14 pares, cada um baseado numa rede AoA (Activity-on-Arc). Naquele estudo, foram obtidos os projetos com múltiplos recursos de forma aleatória a partir das versões com um único recurso. Para esta investigação, porém, é necessário mais controlo pois há mais fatores a analisar além do da multiplicidade de recursos. Assim, apenas os 14 projetos originais com um único recurso foram importados para o novo modelo.

5.1 Obtenção dos Projetos

Os projetos originais servem de base para as diferentes versões usadas com as expA (Experiência A) e expB (Experiência B) programadas para os testes, seguindo a construção esquematizada na figura 5.1. No esquema é dado destaque aos parâmetros mais pertinentes e às etapas de construção.

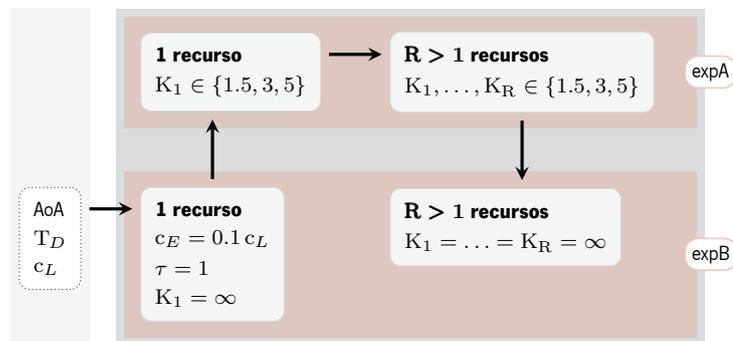


Figura 5.1: Esquema de geração e organização dos projetos de teste.

Cada projeto original estabelece o tronco comum para 4 projetos: 2 para a expA e 2 para a expB. Cada quarteto desses projetos designa-se por grupo, sendo, por exemplo, o grupo 1 (de projetos) aquele baseado na rede AoA 1, e assim sucessivamente. Numa primeira fase, alguns dos novos parâmetros são facilmente inseridos, enquanto outros são importados. A tabela 5.1 mostra os valores dos atributos comuns usados em cada grupo de projetos, à luz do novo modelo. Nomeadamente, o número de atividades A e de nodos N da rede AoA usada; o

Tabela 5.1: Quadro geral dos projetos de teste.

AoA	A	N	d	T _D	c _L	c _E	AoA	A	N	d	T _D	c _L	c _E
1	3	3	0.5	16	2	0.2	8	14	7	0.33	37	3	0.3
2	5	4	0.42	120	8	0.8	9	14	10	0.16	188	6	0.6
3	7	5	0.35	66	5	0.5	10	17	10	0.19	49	7	0.7
4	9	6	0.3	105	4	0.4	11	18	14	0.1	110	10	1.0
5	11	6	0.37	28	8	0.8	12	24	17	0.09	223	12	1.2
6	11	7	0.26	65	5	0.5	13	38	20	0.1	151	5	0.5
7	12	8	0.21	47	4	0.4	14	49	44	0.03	221	5	0.5

parâmetro $c_E = 0.1 c_L$ e a densidade do grafo (a rede AoA) d , obtido como:

$$d = \frac{A}{N(N-1)} \quad (5.1)$$

O parâmetro τ também é comum a todos os projetos e é tido como constante igual a 1, pelo que não aparece tabelado. Ainda, os limites de alocação por recurso em cada atividade, foram tidos como:

$$\ell_{a,r} = 0.5, u_{a,r} = 1.5, \forall a \in \{1, \dots, A\}, r \in \{1, \dots, R\} \quad (5.2)$$

Estes intervalos coincidem com os usados nos projetos originais, salvaguardando que nesses apenas um intervalo existia por atividade.

Da importação dos projetos originais, resulta um conjunto de projetos com um único recurso de capacidade ilimitada, pelo que constituem testes para a expB. Destes, a obtenção dos homólogos com restrições – expA – é feita pela escolha, ao acaso, de limite de disponibilidade K_1 de entre os valores $\{1.5, 3, 5\}$, por projeto.

A determinação das versões com múltiplos recursos, através das versões com um único, é mais complexa. Os valores T_D originais foram escolhidos conforme o comprimento do CP (Critical Path¹) da rede AoA, usando os valores esperados dos conteúdos de trabalho e os pontos médios dos intervalos de alocação, em cada atividade (de apenas um recurso). Por conseguinte, para manter o mesmo T_D , em valor esperado, foi necessário assegurar que aquelas “médias” continuam a ser obtidas nas versões com múltiplos recursos. Os limites permitidos para as alocações são idênticos, para cada recurso em cada atividade e, além disso, coincidem com os que se aplicavam nos projetos originais. Portanto, para encontrar parâmetros adequados às distribuições (exponenciais) por forma a manterem-se aquelas médias, recorre-se ao processo detalhado no anexo B na página 83. Tome-se o seguinte exemplo:

Uma atividade a cujo parâmetro original é $\lambda_a = 0.1$, sendo que o valor esperado é $1/0.1 = 10$. Supondo que se quer uma nova versão considerando o uso de 2 recursos pela mesma atividade, vem que os novos parâmetros $\lambda_{a,1} = \lambda_{a,2}$ são avaliados como λ' (cf. (B.6)):

$$10 = \frac{3}{2\lambda'} \Leftrightarrow \lambda' = \frac{3}{20} = 0.15$$

$$\therefore \lambda_{a,1} = \lambda_{a,2} = 0.15.$$

Ao gerar as versões de múltiplos recursos, escolheu-se um número total de recursos R não superior a 4, arbitrariamente. Os custos unitários de quantidade (c_r) foram mantidos nos casos com um único recurso e escolhidos ao acaso (com valores razoáveis). Observando esses valores, os custos unitários de manutenção (i_r) foram determinados através da fórmula:

$$i_r = 0.2 c_r, \forall r \in \{1, \dots, R\} \quad (5.3)$$

Assim obtidos os projetos de múltiplos recursos da expA, são geradas versões sem as restrições de disponibilidade (i.e. $K_r = \infty$) para completar os projetos para a expB. Na prática, em vez do valor infinito foi usado um

¹Caminho crítico

número suficientemente grande, apurado experimentalmente.

5.2 Nomenclatura dos Projetos

Os nomes dos projetos resumem a sua natureza geral: rede, número de recursos e capacidades. Esta nomenclatura segue o esquema 5.2. O nome identifica o grupo ao qual pertence, seguido de três campos, sendo que os

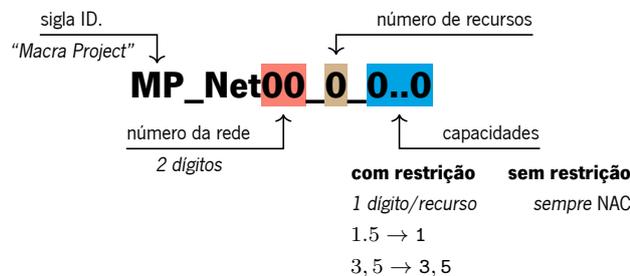


Figura 5.2: Nomenclatura de um projeto.

primeiros dois são triviais. A identificação do grupo é feita através da sigla "MP" seguida da referência à rede, por exemplo MP_Net01 designa o grupo que usa a rede 1. O terceiro campo, consiste numa de duas situações:

Cadeia numérica: Esta implica tratar-se de um projeto da expA. Há um dígito por cada recurso do projeto e, seguindo a ordenação dos índices, cada algarismo corresponde à capacidade desse recurso. Assim, à capacidade 1.5 é atribuído o dígito 1 e às 3 ou 5 é usado o próprio.

Cadeia textual: Este caso é sempre igual à cadeia "NAC", acrónimo para o inglês *not availability constrained*, o que pressupõe tratar-se de um projeto da expB onde não há restrições de capacidade impostas.

Como exemplos de nomenclatura, temos:

MP_Net12_1_5: Projeto do grupo MP_Net12 de um único recurso com capacidade máxima 5.

MP_Net02_4_3155: Projeto do grupo MP_Net02 de 4 recursos com capacidades máximas:

$$K_1 = 3, K_2 = 1.5, K_3 = 5, K_4 = 5$$

MP_Net02_4_NAC: Projeto do grupo MP_Net02 de 4 recursos sem restrição de capacidades. Ou seja, o projeto de expB correspondente ao MP_Net02_4_3155 que é da expA.

5.3 Grupo de Projetos MP_Net02

O grupo MP_Net02 contém projetos cujas atividades seguem as precedências representadas na rede AoA da figura 5.3 na próxima página: os projetos de um único recurso MP_Net02_1_5 e MP_Net02_1_NAC e os MP_Net02_4_3155 e MP_Net02_4_NAC, com 4 recursos.

Os valores dos parâmetros próprios dos recursos, estão na tabela 5.2 na página seguinte. Estão discriminados os casos para um único recurso e para múltiplos e, excetuando os K_r (limites de capacidade máxima), todos os valores são comuns entre os projetos da expA e da expB.

Por fim, os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso em cada atividade, são expostos na tabela 5.3 na próxima página. Não há diferenças entre os usados para expA e os da expB. Cada entrada

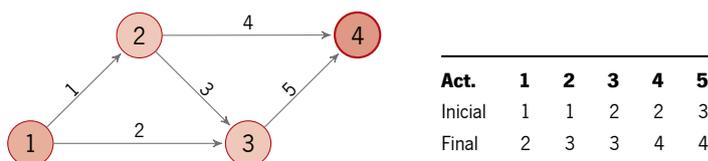


Figura 5.3: Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net02.

Tabela 5.2: Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net02. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

único recurso				múltiplos recursos			
r	K_r	c_r	i_r	r	K_r	c_r	i_r
1	5	1	0.2	1	3	2.5	0.5
				2	1.5	3	0.6
				3	5	3	0.6
				4	5	1.5	0.3

truncada (assinalada com um traço “-”), na informação referente aos projetos com múltiplos recursos, indica que o respetivo recurso não é usado pela atividade correspondente. Por exemplo, a atividade 3 não usa o recurso 4 quer no MP_Net02_4_3155 (expA) quer no MP_Net02_4_NAC (expB).

Tabela 5.3: Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para grupo de projetos MP_Net02. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

a	único	múltiplos			
	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	$\lambda_{a,3}$	$\lambda_{a,4}$
1	0.02	0.02	–	–	–
2	0.03	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625
3	0.04	0.0733	0.0733	0.0733	–
4	0.024	0.044	–	0.044	0.044
5	0.025	0.0375	0.0375	–	–

A listagem completa de todos os 14 grupos de projetos está disponível no anexo A na página 61, para consulta.

6. Implementação Computacional

No modelo matemático, há uma caracterização de cada recurso em cada atividade que o requeira; caracterização essa feita através de um conteúdo de trabalho estocástico. Tais entidades são usadas para determinar quer as durações quer os custos associados a uma qualquer alocação. Por conseguinte, esses valores constituem variáveis aleatórias. As durações de utilização de cada recurso são, ainda, usadas para calcular tanto a duração da atividade (pelo máximo) como o custo de manutenção. Todas estas variáveis aleatórias contribuem para o custo total do projeto, também este, portanto, uma variável aleatória.

6.1 Decisões Preliminares

Dado serem conhecidas as distribuições de cada conteúdo de trabalho, é possível abordar o problema através do estudo probabilístico por forma a se conhecer a distribuição do custo total. Apesar desta metodologia ser a ideal, não é de fácil concretização dada a complexidade do problema. Note-se, sobretudo, que qualquer relação de precedências entre atividades pode permitir concorrência de algumas; porém, tal pode não ser possível conforme se apliquem as outras restrições impostas ao problema que, dado o contexto particular, deverá ocorrer sempre com uma certa probabilidade associada. Considere-se, por exemplo, um projeto do grupo MP_Net02 cujas precedências de atividades se representam na figura 5.3 na página anterior. As atividades 1 e 2 podem executar em paralelo usando certas quantidades de recursos, dentro das restrições de capacidades. Porém, como as suas durações são estocásticas, há uma probabilidade da atividade 1 terminar muito antes da 2. Ora, dependendo da quantidade de recursos alocada pela atividade 2, pode não ser possível, às atividades 3 ou 4, a sua execução logo após término da 1, apesar de permissível pelas precedências. Mais ainda, poderá ser possível apenas que uma dessas possa ocorrer, arbitrariamente. Assim, a antecipação dos vários cenários é já, em si mesma, um processo não determinístico.

Pelo raciocínio acima exposto, evita-se o recurso a métodos exatos ou que impliquem uso de passos bem determinados para a resolução do problema como, por exemplo, a PD (Programação Dinâmica) usada em trabalhos anteriores. Assim, opta-se pelo método de Montecarlo associado a estratégias heurísticas de otimização global.

O esquema do procedimento geral apresenta-se na figura 6.1 na página seguinte. Pelo método de Montecarlo, várias realizações dos conteúdos de trabalho são instanciadas, ao acaso. Por cada uma, torna-se possível determinar as durações de execução das várias atividades em função das alocações, apenas. Deste modo, o problema reduz-se à determinação das alocações e escalonamento que suportem o custo total mínimo. Para isso, o método de otimização global permite testar vários cenários numa estratégia de convergência entre soluções candidatas. No final, os resultados intermédios – um de cada realização de conteúdos de trabalho – são agregados para se obter o resultado final.

Um processo assim baseado em estratégias heurísticas conduz à obtenção de resultados sub-ótimos cuja qualidade dependerá dos algoritmos e do número de realizações para as quais o problema será avaliado. Porém, permite a obtenção de resultados úteis a uma fração da complexidade inicial.

Além da natureza estocástica, as variáveis de decisão são interdependentes na forma como se estabelecem

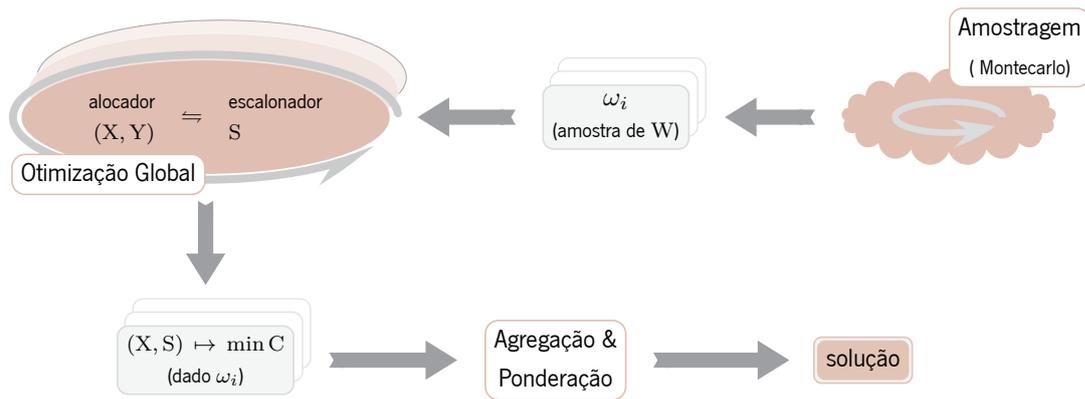


Figura 6.1: Esquema do algoritmo geral desenvolvido.

no objetivo. Quer-se o melhor escalonamento e a melhor tabela de alocação. Isso traduz-se como o custo total mínimo. Contudo, para construir um escalonamento é necessário saber-se a tabela de alocação e saber a tabela de alocação implica ter-se escolhido a melhor. Além disso, qualquer alocação precisa ser validada quanto às restrições de disponibilidade de cada recurso, a cada instante. Porém, o domínio (de tempo) a considerar depende do escalonamento. Isto conduz a uma circularidade na avaliação quando, tal como está definido, o modelo impõe que se determinem as variáveis de decisão em simultâneo.

Uma forma de contornar aquela interdependência está em pressupor que o escalonamento apenas é estabelecido com conhecimento da tabela de alocação com ajuste (no escalonamento) conforme necessário para assegurar validação nas restrições de disponibilidade. Apesar de assim se escapar à simples e direta concordância com o modelo, a conjuntura permite aceitar a estratégia:

- ▶ apesar de qualquer alocação permitir várias durações possíveis (são variáveis aleatórias), como se usa o método de Montecarlo, é seguro assumir que o contexto de avaliação é o de uma realização possível dos conteúdos de trabalho; pelo que os valores se tornam, no contexto, determinísticos;
- ▶ qualquer tabela de alocação suporta sempre, pelo menos, um escalonamento sejam quais forem as condições impostas na realização das várias restrições. No pior caso, o escalonamento degenera num onde todas as atividades ocorrem em cadeia;
- ▶ quanto mais vezes se avaliar o problema, mais tabelas de alocação e escalonamentos serão estabelecidos. Apesar de não obtidos em simultâneo, permite observar uma tão melhor cobertura de casos quanto maior o número daquelas avaliações.

6.1.1 Método de Escalonamento

Escalonar cada atividade consiste em designar os instantes iniciais de execução, assumindo que as atividades não podem ser pausadas e garantindo a validade das restrições de disponibilidade e precedência. Ambas as condicionantes implicam lidar com o potencial de concorrência na execução de várias atividades.

O escalonamento sequencial é um método simples orientado por listas de prioridades. Neste procedimento, as atividades são seriadas em respeito à relação de precedência. Essa ordenação é usada para as escalonar, uma a uma, no primeiro instante que satisfaça as várias condições impostas pelo problema. O algoritmo com o

```

1 function sequentialSchedule(prioList) ::  $\mathbb{N}_0^A$ 
   /* initialization */
2   s := newVector(A);
3   kM := newMatrix(R,  $\infty$ );
4   fillWithZeros(s);
5   for i := 0 to R - 1 do fillRow(kM, i,  $K_{i+1}$ );
   /* scheduling */
6   while notEmpty(prioList) do
7     a := takeActivity(prioList);
8     pred := predecessorsOf(a);
9      $\alpha := \max_{b \in \text{pred}} (s[b] + Y_b)$ ;
   /* find the lowest time period which supports schedule for all resources */
10    repeat
11      for i := 0 to R - 1 do
12        j :=  $\alpha$ ;
13        while true do
14          if  $kM[i][j, \dots, j + Y_a] \geq x_{a,i}$  then
15             $\beta_i := j$ ;
16            break while;
17          else
18             $j := 1 + \max \{ z \mid kM[i][z] < x_{a,i} \wedge j \leq z \leq j + Y_a \}$ ;
19          end
20        end
21      end
22       $\alpha := \max(\beta_1, \dots, \beta_R)$ ;
23    until  $\beta_1 = \dots = \beta_R$ ;
   /* update kM */
24    for i := 0 to R - 1 do
25      for j := 0 to  $Y_{a,i} - 1$  do
26         $kM[i][\alpha + j] := kM[i][\alpha + j] - x_{a,i}$ ;
27      end
28    end
29    s[a] :=  $\alpha$ ;
30  end
   /* return schedule */
31  return s;
32 end function

```

Algoritmo 6.1: Método de escalonamento sequencial com restrições de capacidade máxima de recursos.

pseudo-código 6.1 na página precedente descreve este processo, dada uma lista de prioridades, nas condições aplicáveis ao modelo matemático deste trabalho. Este modelo introduz as restrições de disponibilidade, pelo que é necessário recorrer a uma estrutura adicional. Para tal, é mantida uma matriz cujas linhas são de dimensão, conceptualmente, infinita que funciona como mapa de rastreio dos consumos de cada atividade à medida que são escalonadas, por cada recurso. Concretamente, para que se atribua um instante inicial à execução de uma atividade, o limite inferior imposto pelas precedências é estabelecido. Desde esse valor, o algoritmo procura o primeiro bloco temporal (contíguo) que permita alocar todos os recursos durante toda a execução da atividade. Uma vez determinado, a informação da matriz de rastreio é atualizada antes de prosseguir para a próxima atividade. No final, obtém-se o escalonamento e, colateralmente, o perfil de consumo de cada recurso codificado na matriz de rastreio.

Este algoritmo refugia-se nas seguintes assumpções já garantidas, por definição, pelo modelo matemático:

- ▶ o tempo de execução está particionado em instantes bem determinados (figura 4.1);
- ▶ sempre que o recurso r não seja usado por uma atividade a : $Y_{a,r} = 0$ (eq. (4.5)) e $x_{a,r} = 0$ (eq. (4.13)).

Àquele processo de escalonamento, associa-se as listas de prioridades aleatórias por serem simples. Apesar de carecerem de políticas proativas, estão mais próximas da estrutura induzida pelas estratégias heurísticas sendo que estas orientarão, naturalmente, o sistema através das listas melhores. Além disso, a relativa simplicidade na sua obtenção, agiliza o tratamento de grande número de possíveis seriações de atividades.

6.1.2 Método de Alocação

O processo de alocação segue o algoritmo 6.2. Dadas uma tabela de alocação e uma realização dos conteúdos

```

1 function alloc( $X, \mathcal{W}$ ) ::  $\mathbb{R} \times \mathbb{IN}_0^{\mathbb{R}}$ 
2    $Y :=$  computeDurations( $X, \mathcal{W}$ );
3    $S :=$  findBestSchedule( $X, Y$ );
4    $(C_Q, C_I, C_{ET}) :=$  calcCost( $X, S$ );
5   return  $(C_Q + C_I + C_{ET}, S)$ ;
6 end function

```

Algoritmo 6.2: Método de alocação.

de trabalho \mathcal{W} , calcula as durações de utilização de cada recurso em cada atividade. Quer a tabela de alocação quer as durações determinadas alimentam o procedimento de escalonamento (função findBestSchedule). Esta função é a responsável por invocar instâncias do algoritmo 6.1 na página precedente, testando várias listas de prioridades em busca do melhor escalonamento. Por último, o custo total é avaliado sendo devolvido como resultado, juntamente com o escalonamento (sub-ótimo) obtido.

O referido método é repetido para várias tabelas de alocação, para a mesma amostra dos conteúdos de trabalho, dessa forma obtendo a melhor alocação que suporta o melhor custo total e escalonamento.

6.2 Macra – Plataforma Computacional

Para responder às especificidades do modelo matemático foi criada a plataforma computacional batizada de Macra¹. Esta plataforma constitui uma base expansível e permite diferenciação para várias implementações daquele modelo².

A funcionalidade da Macra está segmentada em quatro camadas lógicas, desde a mais genérica à mais específica: *core*, *model*, *user* e *app*. Para facilitar futuras intervenções, cada camada especifica uma API (Application Programming Interface³) que constitui, tanto quanto possível, uma ponte de abstração para com as camadas mais específicas. O conjunto daquelas API forma toda a interface lógica da Macra (ver figura 6.2):

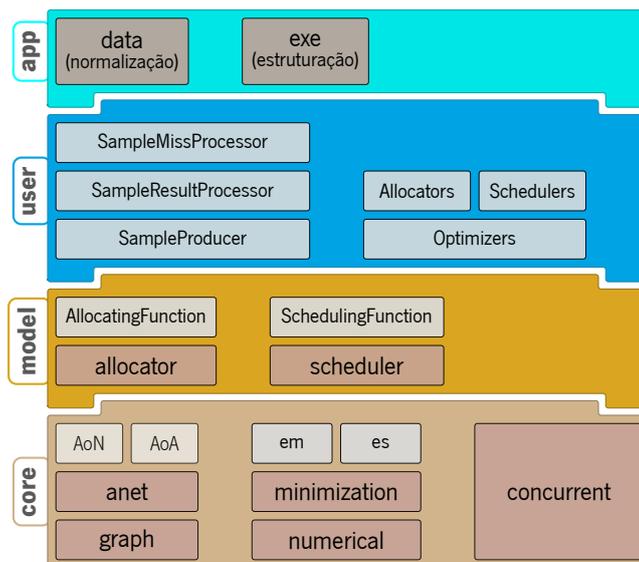


Figura 6.2: Arquitetura geral da plataforma computacional Macra.

Camada core

- ▶ estruturas para as redes de precedências AoA (Activity-on-Arc) e AoN (Activity-on-Node) baseadas em grafos acíclicos orientados;
- ▶ suporte para execução paralela de algoritmos de otimização;
- ▶ implementações base dos algoritmos usados para otimização de funções. Contém, entre outros, os pacotes: “*numerical*”, “*minimization*”, “*em*” e “*es*”.

Camada model

- ▶ especificação e implementação das funções de alocação e escalonamento, conforme os algoritmos 6.1 e 6.2.

Camada user

- ▶ instanciação das estruturas introduzidas em *model*;

¹ Acrónimo de “Multiple Availability Constrained Resource Allocation” que se relaciona com o facto mais relevante do modelo matemático: a alocação/utilização de múltiplos recursos com restrição na disponibilidade (máxima).

² O código fonte encontra-se disponível online através do endereço <http://pessoais.dps.uminho.pt/anabelat/>

³ Interface de Programação de Aplicação

- ▶ permite execução efetiva de ciclos de otimização com ou sem paralelismo;
- ▶ introdução de configurações aos algoritmos usados nas instanciações.

Camada app

- ▶ agrega as estruturas de *user*;
- ▶ estabelece normas para formatos de dados de entrada e seu processamento.

6.2.1 Implementação das Heurísticas

Em Moutinho (2007), os métodos EMA (Electromagnetic Algorithm) e EVA (Evolutionary Algorithm) foram portados do paradigma imperativo original para o de programação por objetos. A Macra continua esse esforço ao criar uma interface genérica base, ao nível da *core* para ambas as heurísticas, permitindo não só a ramificação destas a partir daquele tronco comum como torna possível implementar variantes dos próprios métodos.

De um ponto de vista geral, os métodos referidos são processos que encontram mínimos de funções escalares, isto é, funções que aceitam vetores e retornam um valor numérico. Portanto, isso estabelece a base comum que qualquer heurística deverá implementar. Por exemplo, o EMA original está orientado para funções reais de variáveis reais enquanto a sua versão discreta se aplica a funções reais de variável inteira.

Na prática, as heurísticas não usam valores ou vetores no sentido matemático puro do termo. É comum, o dito valor ser acompanhado de outras estruturas ou contextos. Nesse sentido, o pacote “*numerical*” fornece extensões que permitem qualquer objeto se tornar numérico ou vetor de componentes numéricas e define funções escalares sobre esse conceito. O “*minimization*” forma a base das heurísticas de onde originam as implementações baseadas no método eletromagnético ou em estratégias evolutivas.

O ramo dos EM (Electromagnetism-based Methods), no pacote “*em*”, contém uma versão mais generalizada do EMA original; podendo ser estendida para, por exemplo, procedimentos mais eficientes de cálculo de forças ou, até mesmo, criar outro tipo de interações que se enquadrem no perfil dos EM.

Quanto às ES (Evolution Strategies), o EVA usado em trabalhos anteriores é apenas uma das possíveis configurações. A Macra implementa e exporta vários processos para adaptação e recombinação, dentro do pacote “*es*”, conforme Costa (2003).

6.2.2 Implementação da Otimização

A otimização é um processo que envolve três componentes: amostragem dos conteúdos de trabalho (Montecarlo); determinação da melhor alocação e do melhor escalonamento.

Recolha do Resultado Final

Tradicionalmente, o uso do método de Montecarlo conduz à aplicação de médias dos resultados intermédios (obtidos de cada realização na amostra). No caso em estudo, há duas variáveis de decisão. Por um lado, fazer as médias às tabelas de alocação não será problemático pois tratam-se (cada $x_{a,r}$) de valores reais dentro de um intervalo bem definido mas denso (logo, contínuo). Mas, tratando-se de instantes discretos, os $s_{a,r}$ não poderão ser alvo de média. A acontecer, deveriam ser tomadas medidas corretivas que não estão previstas no modelo matemático. Por se considerar que o tratamento dos resultados obtidos requer outro conjunto de competências ou ferramentas que vão além dos objetivos deste trabalho, não se procede ao retorno típico das referidas médias.

Em alternativa mais simples, toma-se o resultado final como aquele cujo custo e tempo totais estão mais próximos da médias dos custos e tempos totais observados. Ou seja, de todos os resultados, é escolhido um sem o alterar. Porém, para assegurar possível tratamento estatístico, todos os resultados serão recolhidos e armazenados.

Alocação

Pelo algoritmo 6.2 na página 24, encontrar a melhor alocação é buscar o mínimo de uma função f^a caracterizada por:

$$f^a : \mathbb{R}_0^A \times \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R} \times \mathbb{IN}_0^A \quad (6.1)$$

A função admite sempre solução, qualquer que seja o valor de entrada; valores esses de componentes reais. Assim, tomando os valores do contradomínio programaticamente como um objeto numérico representado pelo custo total que transportam, o EMA é adequado para a determinação da melhor alocação.

Escalonamento

Determinar o melhor escalonamento (ver algoritmo 6.1) corresponde a procurar o mínimo de uma função f^s :

$$f^s : L_A \longrightarrow \mathbb{IN}_0^A \quad (6.2)$$

onde L_A é o conjunto de todas as permutações (da ordem) das atividades. Trivialmente, nem todas as permutações corresponderão a listas de prioridades pois nem todas as permutações satisfazem a relação de precedências. Por exemplo, com a relação representada na rede da figura 5.3 na página 20, com 5 atividades, das $5! = 120$ permutações possíveis, apenas se obtém 11 listas de prioridades (ver figura 6.3). A natureza discreta das

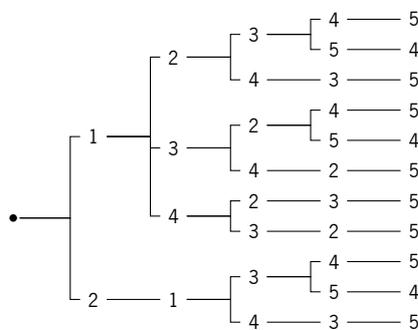


Figura 6.3: Construção de listas de prioridades para a relação de precedências de MP_Net02 (cf. figura 5.3).

permutações inviabiliza a aplicação direta do EMA. Mesmo considerando a versão discreta introduzida por Javadian et al. (2008), o processo de aplicação de forças continua a ser contínuo. No entanto, a noção de eleição de uma componente pivot com base nas alterações noutra vetor serviu de inspiração na implementação de uma ES específica para o caso de listas de prioridades, designado por p-EVA (EVA adaptado a Permutações).

Constituir uma nova ES, consiste em identificar o que é codificado por um indivíduo, quais os tipos de recombinação e adaptação e definir um processo de mutação:

Indivíduo: O vetor de dados codifica uma permutação onde cada componente se faz corresponder a uma atividade, segundo a ordem estabelecida nessa permutação. Por exemplo, $2 < 1 < 3 < 4 < 5$ seria codificada como $(2, 1, 3, 4, 5)$. O valor de um indivíduo é atribuído como o tempo total de execução do escalonamento:

quanto maior, menos viável é o indivíduo;

Recombinação: Tratando-se de (índices de) atividades, não se podem modificar pelo que se usa a recombinação discreta e aplicada apenas aos desvios-padrão;

Adaptação: Usa-se a adaptação não isotrópica por potenciar alterações em cada componente do desvio-padrão de forma independente das outras;

Mutação: Assume um candidato a novo indivíduo, isto é, depois de recombinação e adaptação; e processa-se segundo o algoritmo 6.3. Consiste na escolha de uma componente pivot, a qual comuta com a que está à sua imediata esquerda. Este processo necessita verificação para salvaguardar que o novo indivíduo codifica uma lista de prioridade. Essa validação é feita pela função `isMutationValid`, definida como:

$$\text{isMutationValid}(a,b) \Leftrightarrow \neg(a \ll b \vee b \ll a) \quad (6.3)$$

onde

$$a \ll b \Leftrightarrow b \in \text{Suc}(a) \vee (\exists c \in \text{Suc}(a) : c \ll b) \quad (6.4)$$

para $\text{Suc}(a) = \{x \mid P(a, x)\}$. Caso a verificação falhe, o novo indivíduo é descartado e um, de entre a população, é aleatoriamente escolhido no seu lugar.

Seleção: este processo ocorre de forma semelhante a outras ES.

```

1 procedure permMutation(data, sd)
   /* assumption: length(data)=length(sd)>1 */
2   i := 1; /* start with second element */
3   max := randomOf(N(0, sd[1]));
4   for j := 2 to A - 1 do
5     tmp := randomOf(N(0, sd[j]));
6     if max < tmp then
7       i := j;
8       max := tmp;
9     end
10  end
11  if isMutationValid(data[i], data[i - 1]) then
12    swap(data, i, i - 1);
13  else
14    discard;
15  end
16 end procedure

```

Algoritmo 6.3: Procedimento de mutação na ES aplicável a permutações.

Para que o processo de verificação após mutação seja efetivo, é necessário salvaguardar que a permutação, antes de sofrer a mutação, está válida. Portanto, a população inicial de indivíduos terá de ser inicializada apenas com permutações válidas e um novo candidato a indivíduo, ao ser gerado a partir de ρ progenitores, deve

herdar uma cópia integral dos dados (permutação) de um dos pais, sem perda de generalidade. Notar que a recombinação escolhida para o processo apenas afeta os desvios-padrão.

O estabelecimento da população inicial implica gerar permutações aleatórias. Na presente versão, a Macra não implementa métodos eficientes para aquela geração. O problema não consiste apenas em encontrar permutações de forma aleatória e não enviesada; importa incidir sobre as que são válidas. O método atual consiste em dois momentos. No primeiro, faz-se uma travessia da árvore de precedências, conforme a estrutura exemplificada na figura 6.3 na página 27, de forma aleatória em cada bifurcação. Para projetos pequenos, é possível obter todas as possíveis. Caso contrário, é estabelecido um limite. Depois de geradas, são guardadas para referência futura. O segundo momento ocorre sempre que se precisa gerar uma população inicial; bastando escolher ao acaso uma permutação da base guardada previamente.

As alterações, acima descritas, incidem, sobretudo, sobre a geração de um novo indivíduo entre gerações (cf. esquema 6.4).

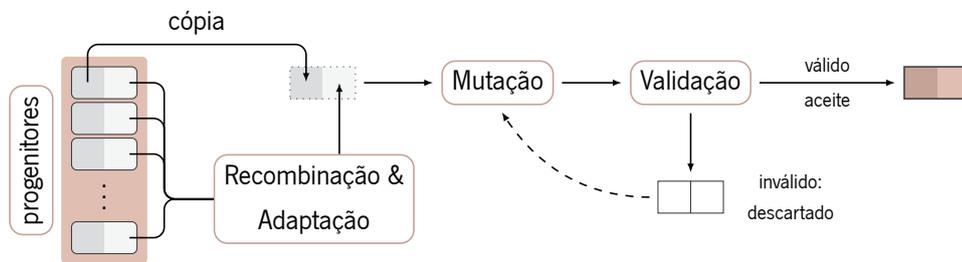


Figura 6.4: Esquema da geração de um novo indivíduo na ES adaptada.

Para clarificação, considere-se o seguinte exemplo, no contexto da relação de precedências do grupo de projetos MP_Net02.

A relação de precedências, para o grupo MP_Net02, é

$$P = \{(1, 3), (1, 4), (2, 5), (3, 5)\}$$

pele que, recorrendo à definição na equação (6.4), vem, por exemplo, $1 \ll 3$ e ainda, $1 \ll 5$ pois $3 \in \text{Suc}(1) \wedge 3 \ll 5$. Completando o exercício, a relação \ll fica determinada:

$$\ll = \{(1, 3), (1, 4), (1, 5), (2, 5), (3, 5)\} \quad (6.5)$$

Considere-se os indivíduos α e β , correspondentes às listas $2 < 1 < 3 < 4 < 5$ e $1 < 2 < 4 < 3 < 5$, respetivamente:

$$\alpha \mapsto \left[\frac{x_\alpha = (2, 1, 3, 4, 5)}{\sigma_\alpha = (0.1, 0.05, 0.2, 0.3, 0.1)} \right] \quad \beta \mapsto \left[\frac{x_\beta = (1, 2, 4, 3, 5)}{\sigma_\beta = (0.05, 0.03, 0.2, 0.5, 0.01)} \right]$$

onde x corresponde à representação da lista de prioridades e σ são os desvios-padrão próprios do algoritmo, associados a cada componente de x .

Supondo que aqueles indivíduos são os escolhidos para gerarem um novo, denominado φ , o primeiro passo

consiste em replicar x de algum desses progenitores. Sem perda de generalidade, faça-se

$$x_\varphi = (2, 1, 3, 4, 5)$$

Então, por recombinação discreta, o vetor dos desvios-padrão σ_φ vem com as componentes preenchidas por escolha ao acaso entre as homólogas dos progenitores, seja:

$$\sigma_\varphi = (0.05, 0.05, 0.2, 0.5, 0.01)$$

De seguida, a adaptação não isotrópica vem atualizar aqueles σ_φ conforme a equação (2.4), tomando $\Delta\sigma = 1/\sqrt{2\sqrt{5}}$ e $\Delta\bar{\sigma} = 1/\sqrt{10}$. Assim, geram-se, ao acaso

$$z \sim N(0, \Delta\bar{\sigma}^2) \mapsto z = 0.48 \quad z_i \sim N(0, \Delta\sigma^2) \mapsto z_i = (-0.28, 0.12, 0.34, -0.21, 0.2), \quad i = 1, \dots, 5$$

Depois de atualizado σ_φ , por aplicação desses z e z_i , o indivíduo φ fica estabelecido:

$$\varphi \mapsto \left[\frac{x_\varphi = (2, 1, 3, 4, 5)}{\sigma_\varphi = (0.05, 0.05, 0.07, 0.39, 0.01)} \right]$$

Finalmente, a mutação consiste em gerar vetores, digamos m , de componentes cujos valores são obtidos por acaso, segundo a distribuição normal aplicada com σ_φ :

$$m = (m_1, m_2, m_3, m_4, m_5), \quad m_i \sim N(0, \sigma_{\varphi_i})$$

e, com base nesses, escolher a componente pivot. Termina-se, assim, este exemplo com dois casos representativos:

$m = (0.01, -0.01, -0.11, 0.13, 0)$ para a mutação, escolhe-se de entre as componentes, à exceção da primeira, aquela com maior valor. Neste caso, a quarta componente, com 0.13. Portanto, o vetor x_φ irá sofrer mutação pela troca da quarta componente pela terceira (a imediatamente à esquerda). Isso significa trocar a ordem das atividades 4 e 3, na lista. Ora, consultando a relação \ll , inicialmente determinada, vem que

$$\neg(3 \ll 4 \vee 4 \ll 3)$$

Portanto, o processo termina com um novo indivíduo viável que corresponde à lista $2 < 1 < 4 < 3 < 5$:

$$\varphi \mapsto \left[\frac{x_\varphi = (2, 1, \mathbf{4}, \mathbf{3}, 5)}{\sigma_\varphi = (0.05, 0.05, \mathbf{0.39}, \mathbf{0.07}, 0.01)} \right]$$

$m = (0., -0.02, 0.17, -1.23, -0.01)$ neste caso, a troca ocorre entre as componentes terceira e segunda do x_φ , ou seja, entre as atividades 3 e 1. Porém, essa troca não é válida, pelo que neste caso, o indivíduo φ degenera.

Procedimento Geral

De acordo com o acima estabelecido, a otimização consiste em dois ciclos de avaliações, por cada realização de conteúdos de trabalho. No ciclo exterior, o EMA localiza a tabela de alocação cujo custo total associado seja

mínimo. Este processo invoca, por cada tabela a explorar, um ciclo interior que recorre ao p-EVA, a ES desenhada para procurar a lista de prioridades que suporta o melhor escalonamento.

6.2.3 Computação Paralela

A plataforma explora computação paralela a vários níveis.

As heurísticas envolvem baterias de cálculos similares em várias instâncias. A Macra implementa versões daqueles processos que podem ser avaliadas em modo concorrente. Nesse aspeto, por exemplo, cada partícula num ciclo EMA pode avaliar o seu resultado paralelamente às outras antes de serem aplicadas as forças de atração/repulsão (que dependem daqueles valores).

A tarefa principal de otimização consiste na avaliação sistemática de uma simulação por cada realização de conteúdos de trabalho. Cada uma é totalmente independente de outra. Portanto, também podem ser feitas de modo concorrente.

Em termos gerais, a plataforma permite que a tarefa principal aceite configuração isolada de cada aspeto passível de computação paralela através de executores que potenciam o descentralizar das execuções conforme necessário ou conveniente. Por exemplo, é possível dedicar um executor mais limitado para as alocações e outro, com mais recursos, dedicado aos escalonamentos. As componentes acessíveis a este controlo são:

“SampleProducer”: dedicado a gerar realizações dos conteúdos de trabalho;

“SampleResultProcessor”: dedicado à recolha e armazenamento dos resultados;

“SampleMissProcessor”: dedicado ao tratamento de simulações que falharam por algum motivo;

“Allocator”: responsável pelo ciclo externo de avaliações – EMA;

“Scheduler”: responsável pelo ciclo interno de avaliações – ES (em particular, o p-EVA);

Processador Principal: um executor que mantém o processo principal da tarefa de otimização. Este executor permite controlo adicional especialmente desenhado para interação com algum controlador: pausar, retomar, cancelar.

Além de executores, foi desenhada uma *cache* para as avaliações de escalonamento. A motivação está no potencial do aproveitamento de conhecimento prévio quando duas listas de prioridades são muito próximas. Por exemplo, se o escalonamento suportado pela lista $1 < 2 < 3 < 4 < 5$ já foi estabelecido, então, mantendo-se as durações e tabela de alocações, quando uma lista $1 < 2 < 3 < 5 < 4$ for avaliada, é seguro assumir que os escalonamentos serão idênticos para as primeiras $1 < 2 < 3$ atividades. Teoricamente, este processo é tão mais vantajoso quanto mais recursos estiverem envolvidos nas atividades por implicar mais complexidade no escalonamento. Porém, nessas situações também haverá uma maior pressão sobre os recursos computacionais como a memória.

6.2.4 Processamento de Dados de Entrada

A Macra especifica um formato xml que descreve um projeto com todas as informações relevantes ao modelo matemático. Além deste formato canónico, pode ser expandida para suportar outras fontes de dados através de um processo de normalização disponível na camada *app*.

Internamente, a plataforma usa uma versão binária normalizada e otimizada para a execução de tarefas sobre um projeto. O ficheiro fonte, xml canónico ou outro, é normalizado e depois compilado. Este tratamento dos dados de entrada permite abstrair os algoritmos internos e processar um projeto para obter estruturas mais próximas daqueles métodos. Por exemplo, uma versão matricial da relação de precedências que pode ser facilmente copiada e usada diretamente para escalonar atividades aquando das simulações. Também nesta fase, é preparada uma base de permutações válidas para povoar os sistemas p-EVA.

A plataforma não produz ficheiros de saída mas delega cada resultado aos processadores coletores. É da responsabilidade das aplicações baseadas na Macra, a produção de formatos oportunos.

6.3 Macra Aethra – Interface Gráfica

A interface gráfica é uma aplicação da plataforma Macra com dois objetivos gerais: execução de testes e a gestão e processamento. A Macra Aethra é, por isso, composta por duas aplicações.

6.3.1 aethra.cp – Aplicação Administrativa

Esta aplicação fornece ferramentas para produção de testes, armazenamento e inspeção de resultados.

Produção

A partir desta aplicação, é possível compilar projetos com parametrização acerca da base de permutações a criar. É possível gerar um banco aleatório ou importar um de outra compilação do mesmo projeto. Isto foi útil para o planeamento da expB (Experiência B) onde é vital manter as mesmas bases de permutações válidas a fim de permitir a análise cruzada dos resultados por cada uma das experiências.

Para o desenvolvimento de testes, foi desenhado um formato binário capaz de incluir toda a informação necessária à simulação em várias máquinas. Esse formato, denominado *job*, inclui a versão compilada do projeto e as configurações dos algoritmos EMA e p-EVA usados.

É possível explorar o conteúdo dos ficheiros de projetos compilados observando detalhes sobre as suas propriedades como a base de permutações. Também é possível verificar as configurações guardadas num *job*.

Recolha

Para o armazenamento de todos os resultados, usa-se uma base de dados SQLite. Esta base de dados agrega não só os resultados como uma miríade de informação desde as características das máquinas envolvidas até às versões de Java usadas. Desta forma, toda a informação relevante poderá ser explorada em análises aos resultados de forma independente à implementação quer da Macra quer da Macra Aethra, usando ferramentas externas.

Inspeção

Os ficheiros individuais recolhidos de cada sessão de simulação podem ser explorados, como acontece com os *job* e projetos compilados. Além disso, é possível a inspeção gráfica dos resultados armazenados em base de dados (ver figura 6.5 na próxima página).

Na inspeção de resultados, determina-se um intervalo de confiança e a aplicação recolhe e exhibe os resultados

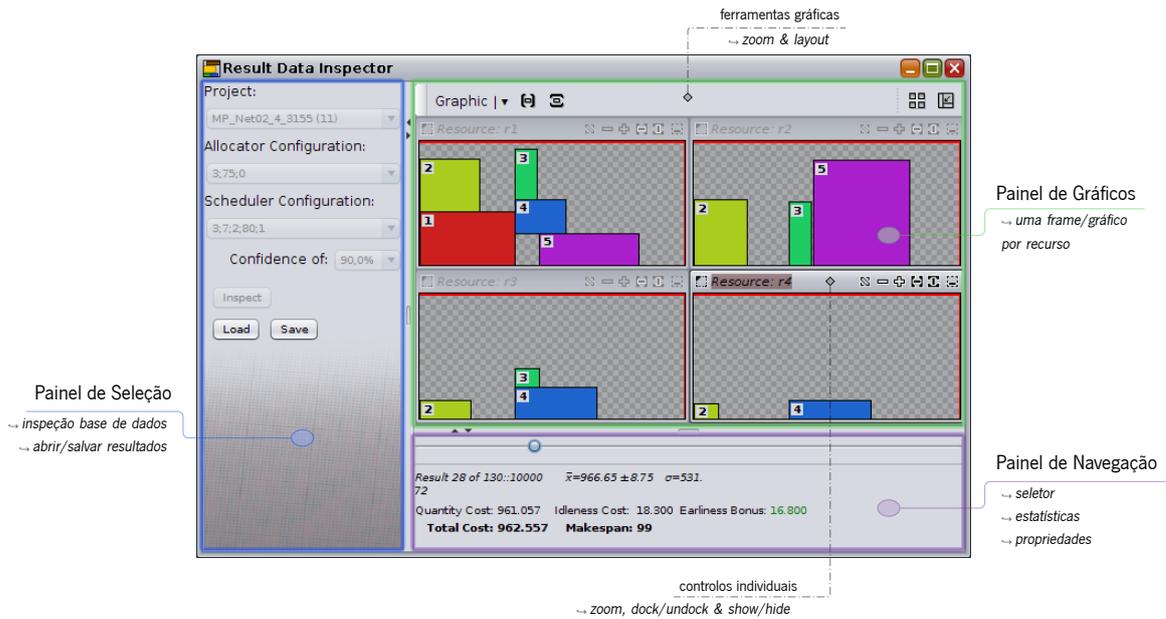


Figura 6.5: Detalhe do Result Data Inspector.

nele contidos. É possível guardar e recuperar esses dados em ficheiros externos.

6.3.2 aethra.je – Aplicação Executiva

Esta aplicação foi pensada para utilizadores não familiarizados com a temática deste estudo. O seu único objetivo é executar simulações. De cada sessão resulta um ficheiro que além dos resultados, propriamente ditos, contém todo o *job* usado bem como informação sobre as capacidades da máquina (processador e memória) e configuração usadas.

A tarefa principal de otimização da Macra pode ser executada de forma independente em várias máquinas e tantas vezes quantas se desejar. Assim, uma forma de obter o maior número de resultados possível em menos tempo, está em recrutar voluntários ou requisitar máquinas para executarem sessões de otimização. Para responder aos desafios próprios desta estratégia, foram seguidas as seguintes orientações:

Simplicidade: foi feito um esforço para manter a interface (ver figura 6.6) limpa, tendo apenas um botão que abre um tutor onde é pedida informação relevante. No mínimo, basta um único ficheiro para que seja possível

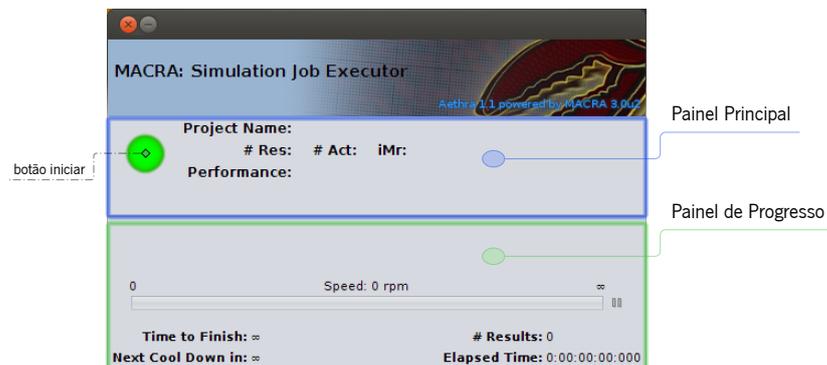


Figura 6.6: A janela principal da Simulation Job Executor.

iniciar a sessão – o *job*. O ficheiro de recolha de resultados é determinado automaticamente embora possa ser alterado.

Configuração: permite configurar o executor de forma a definir limites quer de performance quer de tempo de execução. Um dos pontos mais importantes está na exibição de vários modos de exigência em termos de processador da máquina anfitriã, sob a forma de percentagens máximas. Para ajudar a antecipar o grau de exigência de um *job*, é calculada uma razão, denominada *iMr*:

$$iMr = \begin{cases} \frac{\alpha}{A \times R} & R > 1 \\ 0 & R = 1 \end{cases} \quad (6.6)$$

onde α é a incidência dos recursos por todas as atividades:

$$\alpha = \sum_{a=1}^A \sum_{r=1}^R \delta(a, r) \quad (6.7)$$

Assim, o *iMr* será tão mais próximo de 1 quanto mais *densa* for a multiplicidade de recursos. A relação não é determinante e serve apenas como indicador.

Controlo: O utilizador pode gerir pausas automáticas e periódicas no processo ou pausar e retomar, manualmente, em qualquer momento. Esta possibilidade de pausa pode ser útil para efetuar alguma tarefa na máquina sem perturbar a performance do executor.

Resistência: A aplicação pode ser fechada a qualquer momento durante a execução, mesmo se pausada, com mínimo risco de se perder dados entretanto recolhidos. Apesar disso, é disponibilizado um botão de cancelamento não abrupto.

7. Procedimentos e Resultados Experimentais

O modelo matemático, através da sua implementação Macra Aethra, foi testado num total de 56 projetos, divididos em duas fases de experiências feitos em várias máquinas de uso regular doméstico.

7.1 Procedimentos

Para testar quer o comportamento do modelo quer a plataforma informática implementada, foram adaptados projetos de trabalhos anteriores.

A listagem e detalhes sobre todos os projetos usados pode ser consultada no anexo A na página 61.

7.1.1 Configurações dos Algoritmos

A implementação recorre a dois algoritmos heurísticos: o EMA (Electromagnetic Algorithm) e o p-EVA (EVA adaptado a Permutações). As simulações efetuadas usaram quatro configurações sobre cada um dos projetos testados: duas configurações por cada um daqueles algoritmos.

Há a configuração por defeito “Default” e uma variação mais leve “Light”. Os valores dos parâmetros de cada uma estão na tabela 7.1. O EMA admite configuração do número máximo de iterações (maxIter), do número

Tabela 7.1: Configurações dos algoritmos usadas nos testes.

	EMA			p-EVA				
	maxIter	nP	lsIter	μ	λ	ρ	maxGen	mft
Default	250	10	0	10	20	5	250	1
Light	75	3	0	3	7	2	80	1

de ciclos de busca local em torno da melhor partícula, a cada iteração (lsIter) e o número de partículas do sistema (nP). Por seu lado, o p-EVA admite o número total de indivíduos de cada população (μ), o número de descendentes a serem criados a cada geração/iteração (λ), o número de progenitores envolvidos na criação de cada descendente (ρ), o número máximo de gerações/iterações (maxGen) e o máximo de tentativas de mutação antes de declarar um potencial descendente como degenerado (mft).

As quatro configurações resultam das combinações possíveis sobre aquelas versões. A DD (Default-Default) corresponde à aplicação dos parâmetros por defeito a ambos os algoritmos e a LL (Light-Light) a ambos na versão leve. A DL (Default-Light) combina a padrão do EMA com a leve do p-EVA enquanto a LD (Light-Default) usa a leve do EMA com a padrão do p-EVA.

7.1.2 Execução, Recolha e Processamento

Para ambas as experiências foram usados projetos compilados com uma base de permutações não maior que 1000. As bases de permutações usadas nos projetos na expA (Experiência A) foram importados para os homólogos da expB (Experiência B).

As simulações foram executadas em máquinas domésticas por voluntários que receberam os ficheiros compilados prontos a serem executados com a aethra.je disponibilizada, oportunamente. Esses ficheiros encapsulam tudo desde a configuração dos algoritmos a usar até todas as propriedades dos projetos. Porém, nada foi exigido quanto à configuração das opções de desempenho na execução.

De cada simulação, ou sessão, resultou um ficheiro contendo o pacote de execução, a lista de resultados e síntese do ambiente de execução. Cada sessão foi sendo processada e armazenada numa base de dados.

A expA explora completamente o novo modelo matemático; por isso, se recolheu no mínimo 10000 resultados por cada projeto em cada configuração. Na expB a motivação está em observar o comportamento do modelo quando a restrição de disponibilidade do recurso é suprimida; pelo que se aceitou um mínimo de 1000.

7.2 Resultados Experimentais

Os sistemas operativos, arquitetura e número de núcleos dos processadores de cada máquina participante nos testes estão na tabela 7.2 juntamente com a síntese das contagens dos resultados obtidos e tempo de execução durante ambas as experiências.

Tabela 7.2: Máquinas usadas nos testes, contagem de resultados obtidos e tempos de execução.

#	Sistema	Núc.	expA		expB	
			Contagem	Duração	Contagem	Duração
1	Windows 7 (64 bits)	8	714683	0d 17:22:33	—	—
2	Windows 7 (64 bits)	2	2066	0d 05:43:20	—	—
3	Windows 7 (64 bits)	4	1282353	8d 14:37:01	—	—
4	Windows 7 (32 bits)	4	9218	0d 01:36:40	—	—
5	Windows XP (32 bits)	2	51581	3d 15:23:54	—	—
6	Windows 7 (32 bits)	4	—	—	13383	0d 05:34:49
7	Windows 7 (64 bits)	8	—	—	23034	0d 00:41:02
8	Linux (64 bits)	8	—	—	30337	0d 00:29:23
9	Windows 7 (64 bits)	8	—	—	29000	0d 03:06:30
10	Windows 7 (32 bits)	2	—	—	25447	0d 04:58:54
11	Windows 7 (64 bits)	8	—	—	55000	0d 00:30:40
12	Windows XP (32 bits)	2	—	—	8990	0d 02:49:51

Na expA foram recolhidos um total de 2059901 resultados num tempo total de execução de 13d 06:43:29, através de 5 máquinas. Para a expB estiveram disponíveis 6 máquinas tendo sido obtidos um total de 185191 resultados durante 0d 18:11:12.

Por brevidade, apenas são exibidos, aqui, os resultados para os grupos de projetos MP_Net01 e MP_Net02. A listagem completa pode ser consultada no anexo C na página 85.

São mostrados os intervalos de confiança a 95% para as médias do tempo de execução (T) e custo total (C), apurados de amostras com n realizações de conteúdos de trabalho (ver tabelas 7.3 e 7.4), em cada projeto referido. E, nas figuras 7.1 a 7.8, apresentam-se as suas alocações ($x_{a,r}$) e escalonamentos (s_a).

Tabela 7.3: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projetos MP_Net01, usando cada configuração (DD, DL, LD, LL) em ambas as experiências (expA, expB): intervalos de confiança para as médias dos tempos de execução (\bar{T}) e custo total (\bar{C}) numa amostra de n realizações de conteúdos de trabalho.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n
	<i>MP_Net01_1_5 (expA)</i>			<i>MP_Net01_1_NAC (expB)</i>		
DD	]24.812, 24.984[	]67.993, 68.739[	95611	]24.107, 24.972[	]65.223, 69.039[	3398
DL	]24.631, 25.032[	]67.343, 69.084[	17681	]24.173, 25.598[	]65.183, 71.44[	1400
LD	]23.889, 24.434[	]70.94, 73.32[	10000	]23.219, 24.549[	]68.992, 74.813[	1600
LL	]23.668, 24.206[	]69.801, 72.109[	10000	]23.475, 24.716[	]69.009, 74.345[	1926
	<i>MP_Net01_2_31 (expA)</i>			<i>MP_Net01_2_NAC (expB)</i>		
DD	]25.004, 25.232[	]84.214, 85.206[	40000	]21.086, 21.67[	]78.478, 81.611[	3400
DL	]25.03, 25.49[	]84.088, 86.09[	10000	]21.239, 22.212[	]78.653, 83.986[	1400
LD	]27.019, 27.52[	]94.283, 96.471[	10000	]21.01, 21.967[	]82.253, 87.25[	1400
LL	]26.812, 27.281[	]93.54, 95.591[	11000	]20.806, 21.654[	]82.52, 86.996[	1800

* intervalo de confiança a 95%; n : tamanho da amostra.

Tabela 7.4: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projetos MP_Net02, usando cada configuração (DD, DL, LD, LL) em ambas as experiências (expA, expB): intervalos de confiança para as médias dos tempos de execução (\bar{T}) e custo total (\bar{C}) numa amostra de n realizações de conteúdos de trabalho.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n
	<i>MP_Net02_1_5 (expA)</i>			<i>MP_Net02_1_NAC (expB)</i>		
DD	]116.143, 116.741[	]293.39, 298.561[	66813	]114.988, 118.062[	]281.735, 308.301[	2400
DL	]116.304, 117.866[	]293.972, 307.583[	10000	]114.692, 118.947[	]287.766, 324.592[	1400
LD	]122.442, 124.555[	]353.698, 370.664[	10000	]120.106, 125.581[	]334.635, 378.065[	1400
LL	]122.187, 124.262[	]348.841, 365.428[	10000	]120.723, 125.913[	]341.658, 382.627[	1600
	<i>MP_Net02_4_3155 (expA)</i>			<i>MP_Net02_4_NAC (expB)</i>		
DD	]121.987, 123.021[	]917.463, 931.701[	19002	]117.706, 121.383[	]886.898, 936.858[	1402
DL	]121.289, 122.74[	]911.133, 931.135[	10000	]118.4, 122.297[	]896.795, 949.616[	1400
LD	]126.891, 128.617[	]967.066, 987.933[	10000	]122.672, 127.49[	]950.692, 1006.73[	1400
LL	]125.7, 127.407[	]956.224, 977.069[	10000	]123.106, 127.834[	]949.774, 1006.22[	1400

* intervalo de confiança a 95%; n : tamanho da amostra.

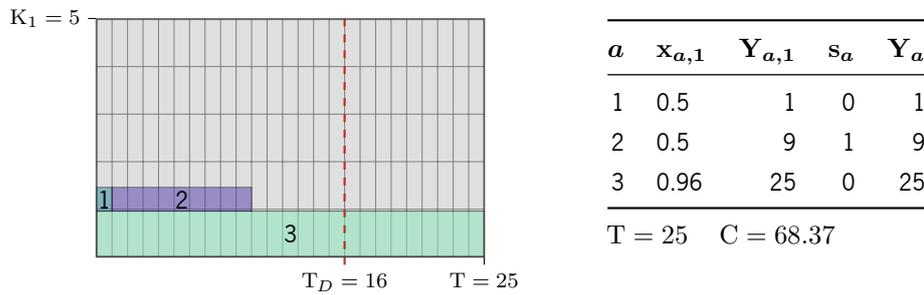


Figura 7.1: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_1_5, na configuração DD. À esquerda, o diagrama de escalonamento, assinalando a capacidade máxima de recurso (K_1) e o prazo de execução (T_D). À direita, a tabela com os valores de: alocação ($x_{a,1}$), durações de utilização ($Y_{a,1}$), início e tempo de execução das atividades (s_a e Y_a); bem como, o custo total (C) e o tempo total de execução (T).

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	0.77	16	0.56	7	0	16
2	1.34	9	1.45	1	16	9
3	0.73	14	0.88	4	0	14

$T = 25 \quad C = 84.7$

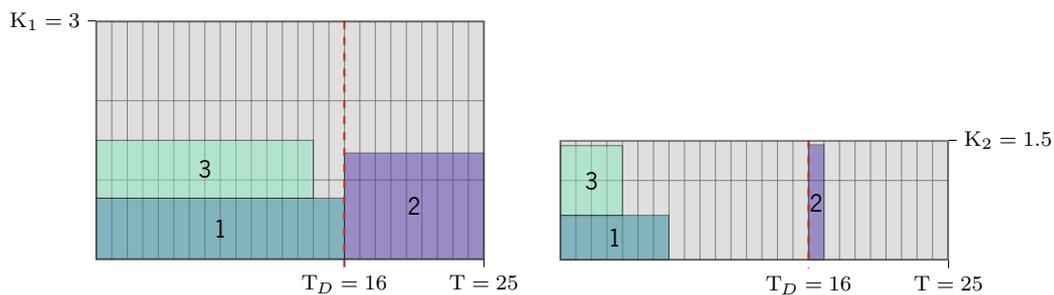


Figura 7.2: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_2_31, na configuração DD. Em cima, a tabela com os valores de: alocação ($x_{a,1}; x_{a,2}$), durações de utilização ($Y_{a,1}; Y_{a,2}$), início e tempo de execução das atividades (s_a e Y_a); bem como, o custo total (C) e o tempo total de execução (T). Em baixo, os diagramas de escalonamento (um por recurso), assinalando a capacidade máxima de cada recurso ($K_1; K_2$) e o prazo de execução (T_D).

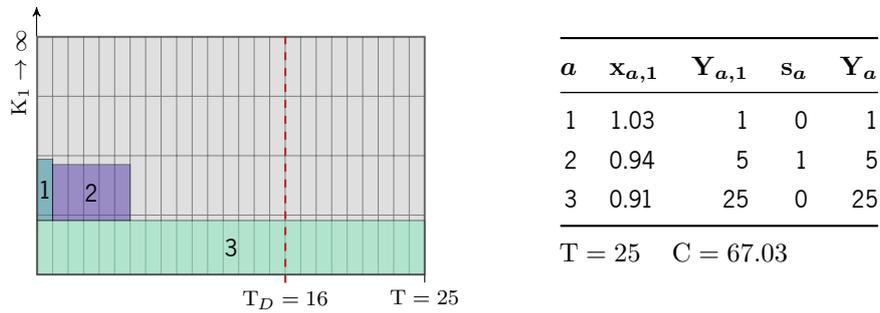


Figura 7.3: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_1_NAC, na configuração DD. À esquerda, o diagrama de escalonamento, sem restrição à capacidade máxima de recurso, i.e. ($K_1 = \infty$) e o prazo de execução (T_D). À direita, a tabela com os valores de: alocação ($x_{a,1}$), durações de utilização ($Y_{a,1}$), início e tempo de execução das atividades (s_a e Y_a); bem como, o custo total (C) e o tempo total de execução (T).

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	0.64	11	0.72	4	0	11
2	1.1	1	1.07	10	11	10
3	0.79	19	1.38	2	0	19

$T = 21 \quad C = 79.7$

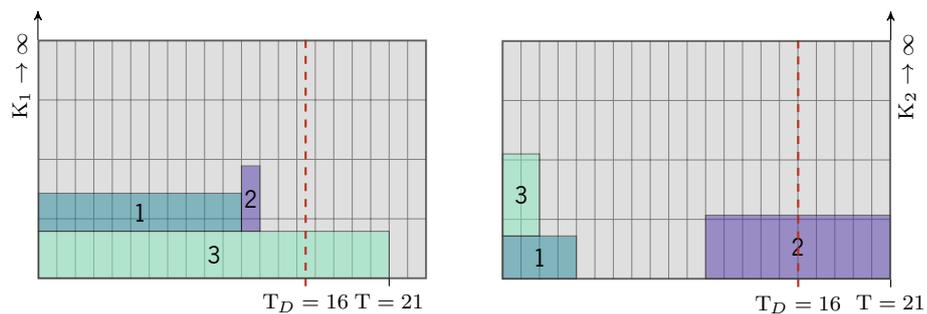


Figura 7.4: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_2_NAC, na configuração DD. Em cima, a tabela com os valores de: alocação ($x_{a,1}; x_{a,2}$), durações de utilização ($Y_{a,1}; Y_{a,2}$), início e tempo de execução das atividades (s_a e Y_a); bem como, o custo total (C) e o tempo total de execução (T). Em baixo, os diagramas de escalonamento (um por recurso), sem as restrições às capacidades máximas de cada recurso ($K_1 = K_2 = \infty$) e o prazo de execução (T_D).

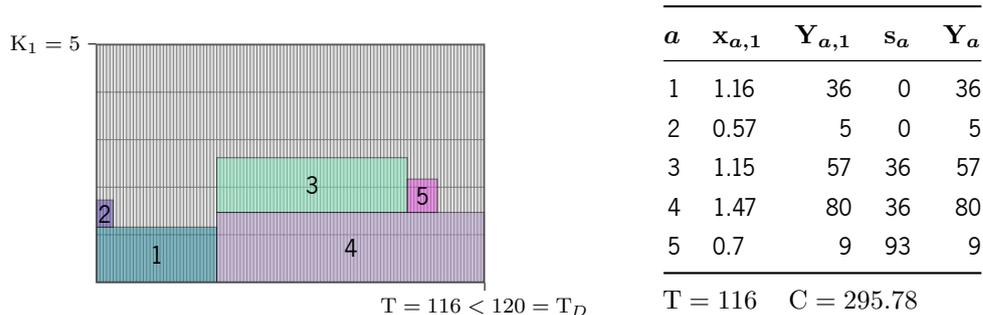


Figura 7.5: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_1_5, na configuração DD. À esquerda, o diagrama de escalonamento, assinalando a capacidade máxima de recurso (K_1) e o prazo de execução (T_D). À direita, a tabela com os valores de: alocação ($x_{a,1}$), durações de utilização ($Y_{a,1}$), início e tempo de execução das atividades (s_a e Y_a); bem como, o custo total (C) e o tempo total de execução (T).

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	$x_{a,4}$	$Y_{a,4}$	s_a	Y_a
1	1.05	62	—	—	—	—	—	—	0	62
2	1.2	55	1.37	5	1.13	4	0.53	17	0	55
3	1.34	5	0.88	1	0.92	28	—	—	62	28
4	1.49	16	—	—	0.72	12	0.71	18	62	18
5	0.61	13	1.3	32	—	—	—	—	90	32

$T = 122$ $C = 924.37$

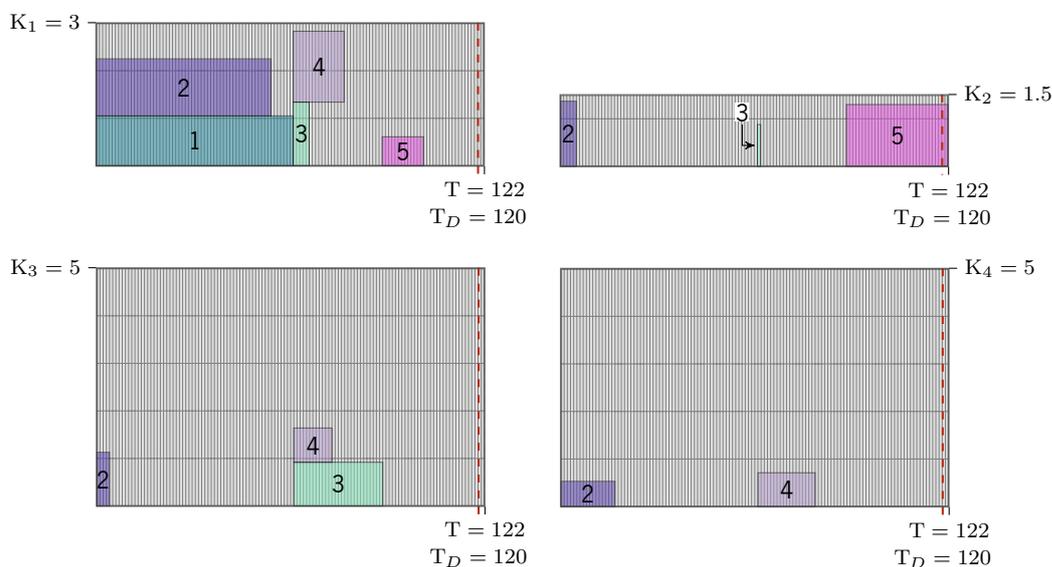


Figura 7.6: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_4_3155, na configuração DD. Em cima, a tabela com os valores de: alocação ($x_{a,1}; x_{a,2}; x_{a,3}; x_{a,4}$), durações de utilização ($Y_{a,1}; Y_{a,2}; Y_{a,3}; Y_{a,4}$), início e tempo de execução das atividades (s_a e Y_a); bem como, o custo total (C) e o tempo total de execução (T). Em baixo, os diagramas de escalonamento (um por recurso), assinalando a capacidade máxima de cada recurso ($K_1; K_2; K_3; K_4$) e o prazo de execução (T_D).

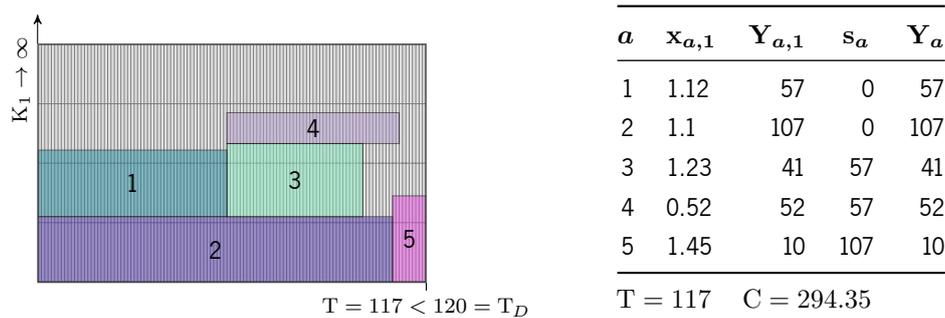


Figura 7.7: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_1_NAC, na configuração DD. À esquerda, o diagrama de escalonamento, sem restrição à capacidade máxima de recurso, i.e. ($K_1 = \infty$) e o prazo de execução (T_D). À direita, a tabela com os valores de: alocação ($x_{a,1}$), durações de utilização ($Y_{a,1}$), início e tempo de execução das atividades (s_a e Y_a); bem como, o custo total (C) e o tempo total de execução (T).

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	$x_{a,4}$	$Y_{a,4}$	s_a	Y_a
1	1.08	36	—	—	—	—	—	—	0	36
2	1.28	38	0.9	24	0.67	31	0.9	7	0	38
3	1.09	7	0.78	17	1.36	5	—	—	36	17
4	0.81	38	—	—	0.97	8	1.37	42	36	42
5	0.94	69	0.52	29	—	—	—	—	53	69

$T = 122$ $C = 911.65$

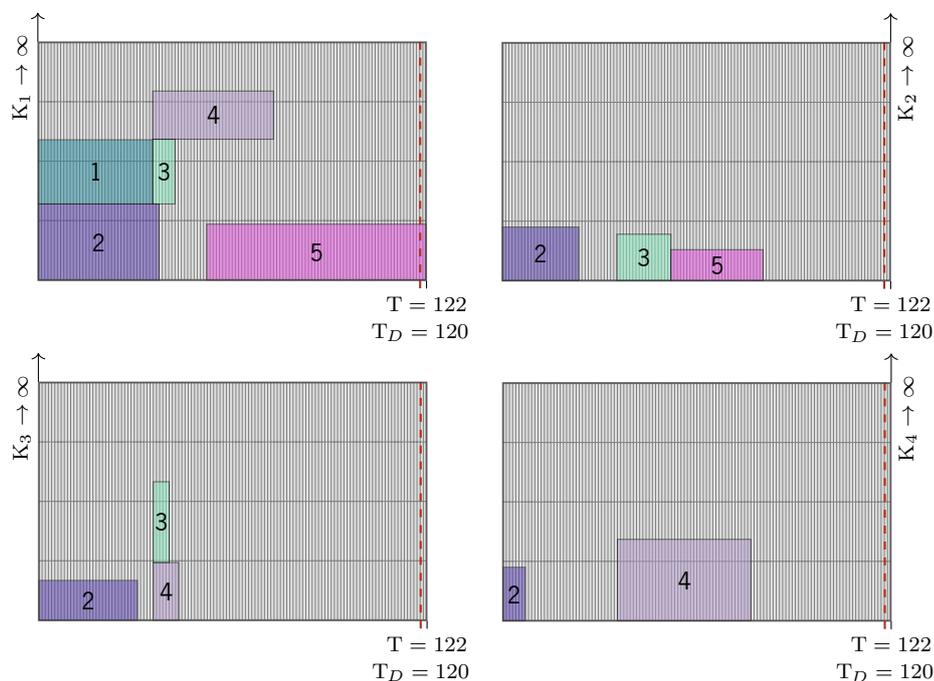


Figura 7.8: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_4_NAC, na configuração DD. Em cima, a tabela com os valores de: alocação ($x_{a,1}; x_{a,2}; x_{a,3}; x_{a,4}$), durações de utilização ($Y_{a,1}; Y_{a,2}; Y_{a,3}; Y_{a,4}$), início e tempo de execução das atividades (s_a e Y_a); bem como, o custo total (C) e o tempo total de execução (T). Em baixo, os diagramas de escalonamento (um por recurso), sem as restrições às capacidades máximas de cada recurso ($K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = \infty$) e o prazo de execução (T_D).

8. Discussão

Tendo obtido resultados para ambas as experiências e todos os projetos, faz-se uma análise a três aspetos: desempenho, resultados médios e dispersão.

8.1 Desempenho da Implementação Computacional

As várias simulações foram feitas em várias máquinas em ambiente não controlado. Além disso, a Macra Aethra permite configurar uma escala de desempenho ao determinar o número de *threads* a atribuir a cada componente das heurísticas. Assim, analisar o desempenho do programa por máquina não é praticável.

A Macra Aethra possibilita o uso de *cache* das avaliações intermédias. Porém, esta funcionalidade foi usada em poucas simulações pelo que não serão analisados esses resultados quanto ao desempenho. Em consulta informal junto dos voluntários que a utilizaram, ficou a sugestão de que o uso de tal estrutura não terá trazido melhorias; podendo até aumentar um pouco o tempo de execução. Uma possível explicação para este comportamento estará no uso mais intensivo da memória que interage com o GC (Garbage Collector) do Java competindo por tempo de processamento.

Para mitigar os efeitos não controlados, calcula-se o valor médio de obtenção de um resultado, por teste, independentemente da máquina onde foi executado. De cada simulação de cada teste foi determinado o tempo de obtenção médio pelo quociente do tempo total sobre a contagem de resultados obtidos, independentemente de qual tenha sido a máquina. Finalmente, aplica-se novamente a média aritmética a todas as sessões de um dado teste. Este valor ponderado final denomina-se tempo médio de obtenção de um resultado. Note-se que pelos motivos acima, as simulações que usaram *cache* não foram incluídas nesta determinação. Estes valores estão tabelados na listagem de resultados (anexo C na página 85).

Na figura 8.1 na página seguinte representa-se, sob a forma de gráfico de barras, os tempos médios de obtenção de resultados por cada grupo de testes, discriminados por configuração usada: DD (Default-Default), DL (Default-Light), LD (Light-Default) e LL (Light-Light). Em cada gráfico, os dois conjuntos de barras à esquerda correspondem à expA (Experiência A) enquanto os dois da direita se referem à expB (Experiência B), numa notação simplificada de projetos: “s-ac” projeto com único recurso, testado na expA; “m-ac” projeto com múltiplos recursos, testado na expA; “s-nac” projeto com único recurso, testado na expB; “m-nac” projeto com múltiplos recursos, testado na expB.

Em todos os casos, a configuração LL – a configuração mais ligeira – apresenta tempos de obtenção muito inferiores aos ocorridos com as outras configurações. Tal era esperado dado o seu carácter simplista. As configurações que combinam versões leves com pesadas – DL e LD – por norma não coincidem, havendo um nítido maior tempo de obtenção através da DL. Em destaque, a DD surge como aquela que comporta o maior tempo de obtenção, à exceção de casos nos grupos MP_Net02 e MP_Net05. Combinando as observações, conclui-se que a configuração dada à componente EMA (Electromagnetic Algorithm) domina (tem efeito mais expressivo) a dada à heurística baseada em p-EVA (EVA adaptado a Permutações), de acordo com a complexidade da dita.

Ainda observando os gráficos, verifica-se que há tendência dos tempos aumentarem quando se compara os

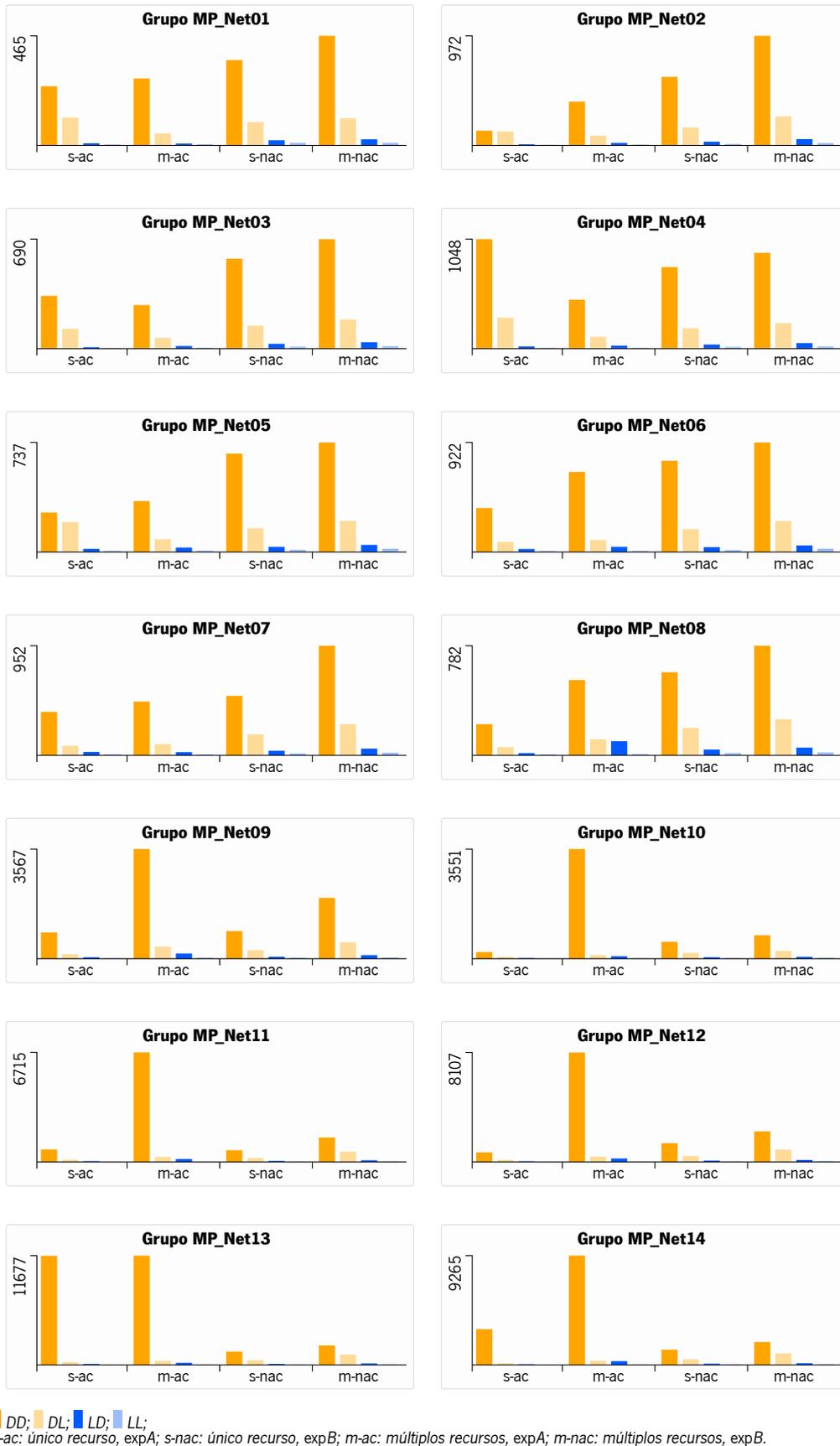


Figura 8.1: Gráficos de barras para os tempos médios de obtenção de um resultado, em milissegundos, por configuração, para cada grupo de projetos testados.

projetos tendo em conta a multiplicidade de recursos. Concretamente, as versões de múltiplos recursos levam mais tempo que as de único recurso. Apesar deste fenómeno ocorrer em ambas as experiências e para (quase) todos os grupos, há uma outra tendência observável: os tempos de obtenção na expB são maiores que na expA. Dado os projetos na expB estarem sem restrições de quantidade máxima de quantidade de recurso, ou seja, numa versão simplificada do modelo matemático de otimização, tal comportamento é intrigante. Pela primeira parte da observação, não parece que a razão possa estar nos projetos nem na abordagem implementada para suportar os casos sem restrição de disponibilidade. Procurando razões externas, há o factor da heterogeneidade das máquinas usadas. Aliás, pela tabela 7.2 na página 36, sabe-se que o grupo de trabalho nas duas experiências não foi o mesmo. No início desta secção, esclarece-se que se usou o tempo médio de obtenção de um resultado como aproximação a um cenário independente daquela heterogeneidade. É claro que tal aproximação beneficia de um maior número de amostras. Ora, na expA houve 149 sessões de simulação, tendo sido obtidos, em média, 13671 resultados em cada. Por seu lado, na expB, foram executadas 373 sessões com uma média de 454 resultados. Portanto, os tempos médios de obtenção apurados para a expB podem estar demasiado sensíveis a casos extremos pontuais quando comparados aos da expA. Outro factor a ter em consideração é a JVM (Java Virtual Machine) que terá sido usada. Verifica-se que em todas as simulações foi usada a versão 7 da Java HotSpot. Na expA a modalidade *client* foi usada cerca de 13% das sessões; ao passo que na expB rondou os 43% sendo que nas restantes foi usada a modalidade *server*. Como a *client* está orientada para um regime de execução de maior interatividade com o utilizador, não usa certas otimizações que melhorariam o desempenho nos casos mais intensivos.

“These two systems are different binaries. They are essentially two different compilers (JITs) interfacing to the same runtime system. The client system is optimal for applications which need fast startup times or small footprints, the server system is optimal for applications where the overall performance is most important. In general the client system is better suited for interactive applications such as GUIs. Some of the other differences include the compilation policy, heap defaults, and inlining policy.”

in http://www.oracle.com/technetwork/java/hotspotfaq-138619.html#compiler_types

Portanto, quer o menor número de resultados obtidos por sessão quer o tipo de máquina virtual estarão a suportar a tendência para maiores tempos de obtenção observados na expB.

Numa última observação, os tempos para a DD, nas versões de múltiplos recursos da expA dos grupos MP_Net09 ao MP_Net14, são muito superiores aos restantes. Partindo do raciocínio usado na análise anterior, este comportamento parece ser sensível às características próprias daqueles grupos. Nos outros, poderá estar presente alguma interação com as propriedades dos projetos. Porém, com os dados recolhidos, não é possível aferir qual o impacto isolado de cada fator. Ressalva-se, ainda, que o grupo MP_Net13 é particularmente penoso também na versão a um único recurso. Crê-se que as mesmas conclusões permanecem válidas neste caso particular.

8.2 Análise às Médias dos Resultados

Nesta secção, procura-se apurar o impacto de cada configuração nos resultados obtidos. Cada um desses resultados é explicitado através de dois intervalos de confiança, a 95% para as médias: um para o custo total, outro para o tempo total de duração do projeto.

Quando observados, simultaneamente, os ditos intervalos formam uma região retangular. Para facilitar a observação comparativa, criou-se o que se chamou de diagramas de caixas. Tais diagramas foram projetados por forma a favorecer a observação relativa entre configurações, quer no mesmo teste quer em testes diferentes. Para conseguir-se tais objetivos, um diagrama de caixas recorre a:

Eixos implícitos: Como os valores concretos dos extremos de cada intervalo não importam na análise relativa, não se usam eixos. Implícitamente, o eixo do tempo está na horizontal enquanto o custo se orienta na vertical. O canto em baixo à esquerda representa o menor valor para ambos.

Enquadramento: Para ser possível a comparação visual mesmo em situações onde os intervalos têm amplitudes muito baixas (ou muito altas), é aplicado um factor de dilatação/contração enquadrando ambos os eixos de forma à sua amplitude máxima coincidir num quadrado. Isto inviabiliza a comparação de amplitudes entre tempo e custo. Porém, o interesse está na comparação combinada e ao aproximar as formas a um quadrado maximiza-se as áreas para observação.

Cores: É seguido um código de cores e tons. As cores laranja e azul correspondem à configuração da EMA pesada e ligeira, respetivamente. Da mesma forma, os tons escuro e claro estão para a p-EVA.

Por brevidade, apenas se apresentarão 3 conjuntos representativos de diagramas.

Observando o caso do grupo MP_Net01 representado na figura 8.2, constata-se que as amplitudes dos intervalos de confiança são manifestamente superiores na expB. Tal é consistente com o facto de terem sido recolhidos muito menos resultados (acima de 1000) na expB que na expA (acima de 10000). Este fenómeno é visível em todos os casos com todos os grupos.

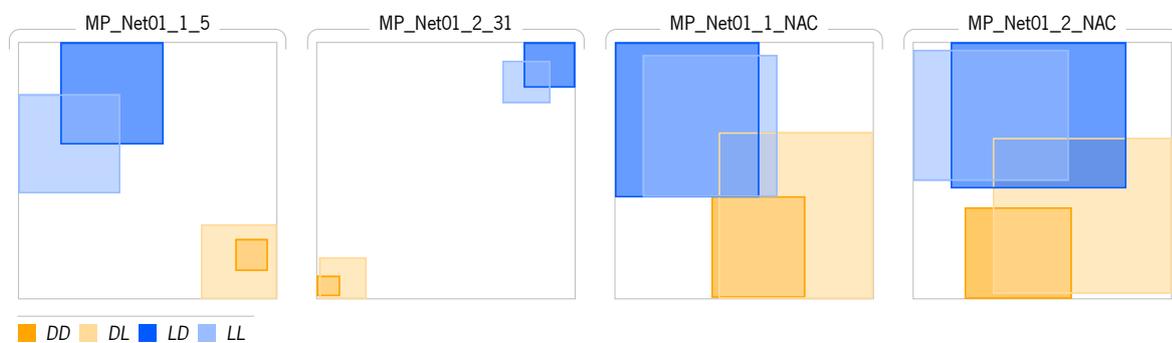


Figura 8.2: Diagrama de caixa dos intervalos de confiança para as médias, do grupo MP_Net01.

É sabido que quando há sobreposição de intervalos de confiança não é possível concluir quanto à diferença entre as médias aferidas por cada um. Nesse sentido, pode-se concluir haver diferença entre as médias obtidas pelas configurações laranja (DD e DL) e as obtidas pelas azuis (LD e LL), nos projetos da expA: MP_Net01_1_5 e MP_Net01_2_31. Mais, essa diferença ocorre nos dois eixos.

Na expB, a configuração DD obtém média de custo menor que as configurações azuis de forma clara no MP_Net01_2_NAC e apenas marginalmente no MP_Net01_1_NAC. Embora o agrupamento em cores não possa ser afirmado, intuitivamente, é aparente que esse fenómeno se verificaria se as amplitudes dos retângulos fossem tão baixas quanto as verificadas na expA.

Para o MP_Net01_1_5, as configurações laranja obtêm melhor custo enquanto as azuis asseguram melhor

tempo. No entanto, para o MP_Net01_2_31 as laranjas comportam, consideravelmente, melhor custo e melhor tempo.

No grupo MP_Net05 (ver figura 8.3), nota-se agrupamento de cores sendo as configurações laranja a obterem valores melhores. Neste caso particular, na expA as DD e DL têm resultados melhores em tempo e em custo. Na expB, a relevância está mais no tempo, não tendo tanto significado tal diferença em termos de custo.



Figura 8.3: Diagrama de caixa dos intervalos de confiança para as médias, do grupo MP_Net05.

Em alguns grupos de projetos, como o caso do MP_Net12 representado na figura 8.4, há clara diferença entre as configurações laranja e as azuis em todos os quatro projetos. De facto, no projeto MP_Net12_2_13 as 4 configurações podem ser totalmente ordenadas, da melhor para a pior: $DD < DL < LD < LL$.

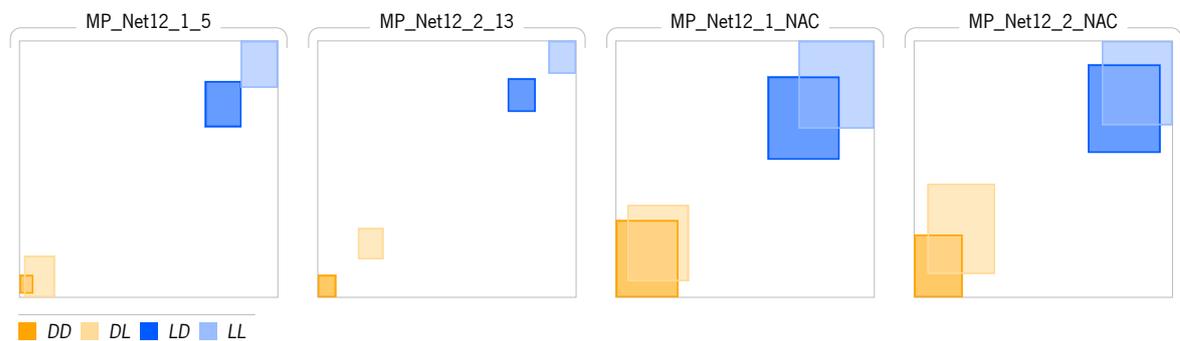


Figura 8.4: Diagrama de caixa dos intervalos de confiança para as médias, do grupo MP_Net12.

Nos casos aqui apresentados e nos restantes, nota-se uma tendência para os intervalos mantidos poderem ser agrupados por cores. As duas configurações laranja tendem a manter-se próximas e o mesmo acontece com as azuis. O mais comum é formarem-se dois grupos, cada um com duas configurações da mesma cor sobrepostos. Mesmo quando a amplitude dos intervalos é grande, e há mais sobreposição, aquele comportamento parece latente. Por outro lado, até nos casos em que não há qualquer sobreposição de intervalos se nota um comportamento mais próximo entre configurações da mesma cor. Os grupos dispõem-se segundo uma das diagonais do diagrama. De facto, à exceção dos MP_Net01_1_5, MP_Net01_1_NAC e MP_Net01_2_NAC (conforme figura 8.2 na página anterior) que se orientam na diagonal dos quadrantes pares, todos os outros casos seguem a outra direção.

Pelo agrupamento em cores, é evidente haver influência da configuração da heurística EMA. Como há grupos onde os retângulos – um escuro e outro claro – não se interseitam, pode concluir-se que a configuração

da p-EVA também tem impacto. Considerando os casos que se dispõem segundo a diagonal dos quadrantes ímpares, o grupo laranja surge aproximado ao canto inferior esquerdo que representa melhor tempo e melhor custo, contrastando com o azul que se aproxima do oposto. Isto significa que a configuração por defeito na EMA domina sobre as outras. Mais, quando aplicável, o retângulo escuro ocorre sempre abaixo e à esquerda do correspondente claro. Pelo que também a aplicação da configuração por defeito na p-EVA suporta valores, tendencialmente, melhores nos resultados, ainda que sem dominar sobre a do EMA.

Uma última observação permite notar que na expB, onde as amplitudes são grandes, o mais comum é haver grupos com sobreposição em custo mas distintos em tempo. Isto sugere que o Macra é mais eficiente a determinar melhor tempo de escalonamento que a avaliar o melhor custo.

8.3 Análise à Distribuição

Quer-se observar o comportamento do modelo do ponto de vista global dos resultados obtidos. Pela análise feita às médias, determinou-se que a configuração DD obteve melhores resultados pelo que este estudo concentrar-se-á nos valores determinados com ela.

Para detetar propriedades gerais de uma distribuição recorreu-se a gráficos de dispersão. Para facilitar as observações, procedeu-se a uma discretização dos valores do custo total por agrupamento em classes de amplitude unitária sendo, então, a marca de cada classe usada como valor representativo. Além disso, os pontos foram divididos em 3 grupos conforme as suas frequências absolutas, aparecendo mapeados a cores distintas.

Existem três aspetos que são facilmente distinguidos: localização, percentis e moda. No quadro 8.1 apresenta-se os vários cenários encontrados durante a observação de todos os gráficos.

Tabela 8.1: Aspetos morfológicos observáveis nos gráficos de dispersão.

<i>Localização</i>	
L1	A nuvem de pontos cruza a reta $T = T_D$
L2	Todos os pontos à direita da reta $T = T_D$
<i>Percentis</i>	
P1	Clara divisão de pontos abaixo e acima dos 90% de frequência absoluta
P2	Apenas há valores acima dos 90% de frequência absoluta
<i>Moda</i>	
M1	Moda bem identificável
M2	Vários pontos modais agregados, tendencialmente, em torno de um central
M3	Vários pontos modais dispersos ou em correlação $T \times C$

A síntese das observações a todos os projetos estão no quadro 8.2 na próxima página para a expA e no quadro 8.3 na página ao lado para a expB. No total, ocorrem sete combinações dos aspetos mencionados com a incidência registada na tabela 8.4 na página 50.

A observação L1 · P1 · M1 é a mais comum devido à grande incidência nos projetos de único recurso da expA. Para a mesma experiência sobre os projetos de múltiplos recursos, a maior prevalência está no aspeto P1. Na expB há uma dispersão mais homogénea das observações sendo algo tendenciosas para os casos

Tabela 8.2: Quadro síntese das observações aos gráficos de dispersão na expA pela configuração DD.

Projeto	Observação			Projeto	Observação		
MP_Net01_1_5	L1	P1	M1	MP_Net01_2_31	L1	P1	M1
MP_Net02_1_5	L1	P1	M1	MP_Net02_4_3155	L1	P1	M2
MP_Net03_1_5	L1	P1	M1	MP_Net03_2_15	L1	P1	M1
MP_Net04_1_1	L1	P2	M3	MP_Net04_2_51	L1	P2	M1
MP_Net05_1_1	L1	P1	M1	MP_Net05_3_333	L1	P1	M1
MP_Net06_1_3	L1	P1	M1	MP_Net06_3_531	L1	P1	M3
MP_Net07_1_3	L1	P1	M1	MP_Net07_4_3555	L1	P1	M2
MP_Net08_1_5	L1	P1	M1	MP_Net08_3_315	L1	P1	M3
MP_Net09_1_3	L1	P1	M2	MP_Net09_3_311	L1	P2	M3
MP_Net10_1_5	L1	P1	M1	MP_Net10_2_33	L1	P1	M2
MP_Net11_1_1	L1	P1	M3	MP_Net11_4_1155	L1	P1	M3
MP_Net12_1_5	L1	P1	M1	MP_Net12_2_13	L2	P2	M3
MP_Net13_1_1	L2	P2	M3	MP_Net13_2_31	L2	P2	M3
MP_Net14_1_5	L1	P1	M1	MP_Net14_2_31	L1	P2	M1

Tabela 8.3: Quadro síntese das observações aos gráficos de dispersão na expB pela configuração DD.

Projeto	Observação			Projeto	Observação		
MP_Net01_1_NAC	L1	P1	M1	MP_Net01_2_NAC	L1	P1	M1
MP_Net02_1_NAC	L1	P2	M1	MP_Net02_4_NAC	L1	P2	M2
MP_Net03_1_NAC	L1	P1	M1	MP_Net03_2_NAC	L1	P2	M1
MP_Net04_1_NAC	L1	P2	M1	MP_Net04_2_NAC	L1	P2	M2
MP_Net05_1_NAC	L1	P1	M1	MP_Net05_3_NAC	L1	P1	M1
MP_Net06_1_NAC	L1	P2	M2	MP_Net06_3_NAC	L1	P2	M3
MP_Net07_1_NAC	L1	P1	M3	MP_Net07_4_NAC	L1	P1	M3
MP_Net08_1_NAC	L1	P1	M1	MP_Net08_3_NAC	L1	P1	M2
MP_Net09_1_NAC	L1	P2	M2	MP_Net09_3_NAC	L1	P2	M3
MP_Net10_1_NAC	L1	P1	M1	MP_Net10_2_NAC	L1	P1	M1
MP_Net11_1_NAC	L1	P2	M3	MP_Net11_4_NAC	L1	P2	M3
MP_Net12_1_NAC	L1	P2	M2	MP_Net12_2_NAC	L1	P2	M2
MP_Net13_1_NAC	L1	P2	M3	MP_Net13_2_NAC	L1	P2	M1
MP_Net14_1_NAC	L1	P2	M3	MP_Net14_2_NAC	L1	P2	M2

Tabela 8.4: Incidência das observações aos gráficos de dispersão.

Observação	expA		expB		Subtotal
	S	M	S	M	
L1 · P1 · M1	10	3	5	3	13 + 8 = 21
L1 · P1 · M2	1	3	0	1	4 + 1 = 5
L1 · P1 · M3	1	3	1	1	4 + 2 = 6
L1 · P2 · M1	0	2	2	2	2 + 4 = 6
L1 · P2 · M2	0	0	3	4	0 + 7 = 7
L1 · P2 · M3	1	1	3	3	2 + 6 = 8
L2 · P2 · M3	1	2	0	0	3 + 0 = 3

S único recurso; M múltiplos recursos

onde P2 se verifica. O predomínio de P2 na expB explica-se pelo número reduzido de resultados obtidos, não sendo suficiente, em muitos casos, para se notar convergência acentuada tipo P1. Ainda, o aspeto L2 aparece unicamente associado na observação L2 · P2 · M3 e manifestada apenas na expA. Segue-se uma descrição de cada uma daquelas observações e suas implicações:

L1 · P1 · M1 Este caso, ilustrado pelo exemplo na figura 8.5 na página ao lado, é o que traduz melhor comportamento acerca do modelo para com o projeto alvo na medida em que revela características desejáveis para a tipologia da implementação usada.

Verifica-se que os pontos de frequência acima do percentil 90 ocorrem concentrados numa nuvem interior, sendo mais bem demarcado na expA. Juntamente com a boa identificação de um ponto modal, aponta para boa convergência do algoritmo.

Há correlação positiva embora seja notória uma diferente orientação entre os pontos com $T < T_D$ e os de $T > T_D$. De facto, para soluções cujo tempo total é inferior ao prazo, o declive da regressão é menor que o dos restantes. Isto está de acordo com a aplicação dos custos/bónus unitários tais que $c_E < c_L$, em todos os projetos.

L1 · P1 · M2 Todos os projetos seguem as mesmas conclusões dos L1 · P1 · M1, à exceção do aspeto M2 por haver uma pequena variabilidade nos pontos modais. A diferença expressa-se na direção do eixo vertical (custo) numa linha muito próxima de $T = T_D$ onde o impacto do custo de atraso/bónus é nulo.

L1 · P1 · M3 Caso mais severo que L1 · P1 · M2 onde os pontos modais variam em tempo e custo. Neste cenário, a distribuição aparenta ser multimodal. Na maior parte dos casos, aponta para a existência de 2 modas, estando uma mais próxima de $T = T_D$ e a outra mais afastada (tempo e custo superiores).

L1 · P2 · M1 A não existência de pontos em frequência inferior a 90% sugere fraca convergência do algoritmo. Contudo, o gráfico toma uma forma em concordância com os cenários anteriores, nomeadamente a L1 · P1 · M1. Constata-se, assim, que para os projetos visados, o algoritmo é rápido a determinar limites de custo e tempo.

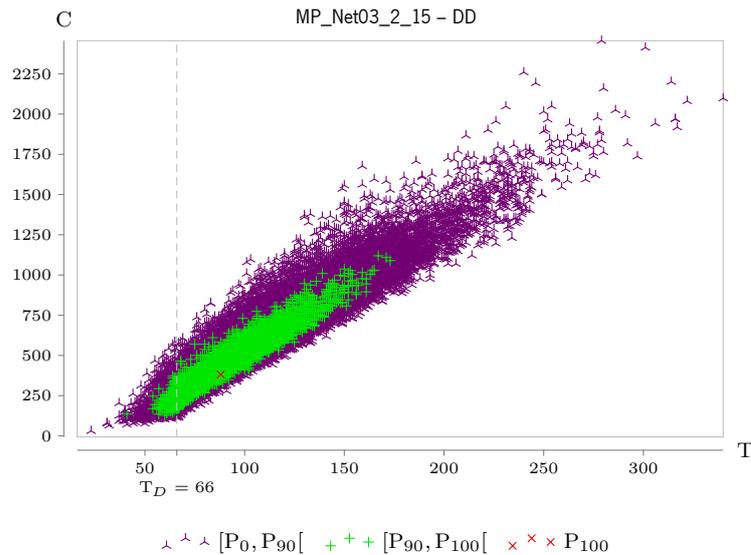


Figura 8.5: Gráfico de dispersão de resultados para MP_Net03_2_15 obtidos pela configuração DD.

L1 · P2 · M2 Este caso está para o L1 · P2 · M1 como o L1 · P1 · M2 está para o L1 · P1 · M1 mas com acentuada variabilidade nos pontos modais que aqui também se manifestam com alguma diferença entre os tempos. Tal variação dever-se-á à fraca convergência.

L1 · P2 · M3 Cenário análogo a L1 · P1 · M3 mas onde eventuais conclusões sobre a existência de moda não são suportáveis pela análise gráfica apenas.

L2 · P2 · M3 Caracteriza o pior dos cenários observados (ver exemplo na figura 8.6 na próxima página). Além da fraca convergência e não determinação de um ponto modal, o modelo falha em obter valores $T \leq T_D$.

Contudo, como acontece nas outras observações, também há correlação positiva. Os valores de menor custo e menor tempo estão mais concentrados enquanto os opostos aparecem mais esparsos, delineando uma forma que se aproxima a um elipsoide assim deformado de forma consistente em todos os projetos dentro deste cenário.

A par das especificidades de cada instância de observação, há propriedades que surgem comuns ou em concordância relativa.

O custo total é a soma de três parcelas: custo de alocação, custo de manutenção e custo/bônus aplicado à discrepância entre o tempo de execução e o prazo pré-definido. Pela construção do algoritmo, não é possível analisar o impacto de cada componente de forma direta e unívoca. Porém, a predominância de certas propriedades observáveis permite a análise indireta.

Tem-se a correlação positiva associada a c_E e a c_L , conforme discutido acima. Ao observar a largura vertical da nuvem de pontos, ao longo do eixo do T , percebe-se que tende a ser menor para os valores de tempo menores e maior no outro extremo. Nos casos L1, os valores menores de tempo apresentam variação de custo muito curta. Isso sugere que o bônus aplicado está a dominar o custo total, reduzindo-o a valores mínimos. Por outro lado, à medida que os valores de tempo aumentam ($T > T_D$) a variação de custo aumenta e a densidade da

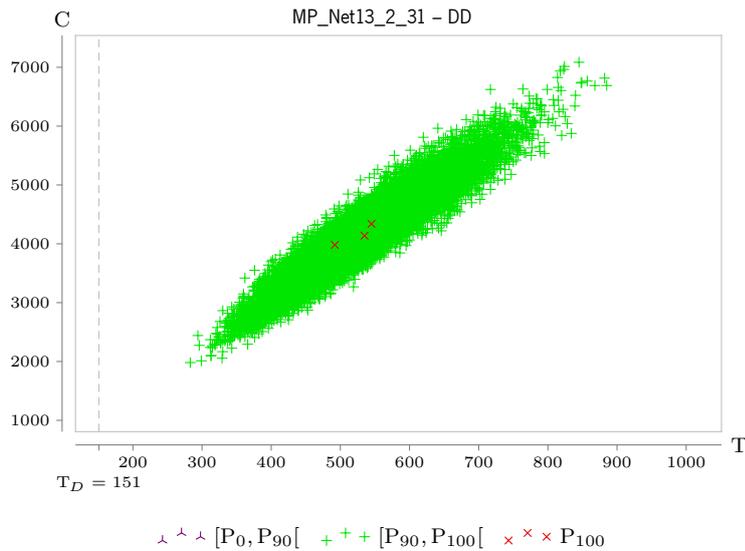


Figura 8.6: Gráfico de dispersão de resultados para MP_Net13_2_31 obtidos pela configuração DD.

nuvem diminui pois o custo de atraso torna-se cada vez mais significativo pelo que o algoritmo tem dificuldade em obter custos inferiores. Nos casos L2, nota-se apenas esta última observação.

Quando se comparam as variantes, dentro do mesmo grupo de projetos e para a mesma experiência, quanto à multiplicidade de recursos, nota-se que para cada valor de tempo, a variação de custo surge maior nas versões com múltiplos recursos. Além disso, ainda nesses casos, a inclinação da nuvem de pontos é maior. Este acentuar da inclinação traduz uma menor capacidade de se obterem custos mínimos correspondente a cada tempo total de execução. Em parte, essa dificuldade estará relacionada com a parcela do custo de manutenção que é sempre nula nos projetos de recurso único. E será essa parcela, quando não nula, que infere a maior variação no custo total obtido em cada valor de tempo total de execução.

8.4 Considerações Finais

Há variáveis que não foram testadas. Nomeadamente, falta perceber os efeitos que bases diferentes de permutações válidas poderiam ter; tão mais pertinente nos casos em que não se verifica comportamento desejável.

Em todas as circunstâncias, o custo e tempo totais seguem correlação positiva. Quer dizer, ambos seguem a mesma tendência mesmo quando parece não haver convergência geral. Esta observação permite aceitar que a estratégia de execução em dois ciclos, um externo e outro interno, obtém as propriedades de otimização em ambas as variáveis de decisão.

9. Conclusões e Trabalho Futuro

Conclusões

Apresentou-se um novo modelo matemático para minimização do custo total de projetos com atividades multimodais em contexto estocástico com múltiplos recursos renováveis mas restritos em disponibilidade máxima. Aquele modelo constitui dois conjuntos de variáveis de decisão interdependentes: a tabela de alocação com as quantidades atribuídas a cada recursos nas atividades; e o escalonamento das atividades.

Uma plataforma computacional foi elaborada para responder às exigências do modelo. Recorre-se a dois métodos heurísticos: o EMA (Electromagnetic Algorithm) e o p-EVA (EVA adaptado a Permutações), sendo que este último é um processo baseado em estratégias evolutivas, tendo sido adaptado para lidar diretamente com listas de prioridades, através de permutações. A plataforma explora programação concorrente quer ao nível interno dos algoritmos quer ao nível do processo principal, através de diversos executores dedicados às diversas componentes.

Foram conduzidos testes a um total de 56 projetos divididos em duas experiências, variando quer em multiplicidade de recursos quer na aplicação de restrição de disponibilidade. Decorreram em diversas sessões independentes e distribuídas por uma equipa de voluntários num total de 12 máquinas heterogêneas e em ambiente doméstico.

Os resultados em termos de desempenho são satisfatórios, mesmo quando se usam configurações mais exigentes. O facto de se poderem executar sessões independentes em máquinas isoladas, sendo posteriormente recolhidos e tratados os resultados, torna expectável que a plataforma possa escalar bem para projetos mais complexos.

A correlação positiva entre custo total e tempo de execução do projeto regista-se em todos os casos em teste. Pelo que a metodologia combinada de duas heurísticas, cada uma abordando um dos dois conjuntos de variáveis de decisão, avaliadas em composição funcional, surte o comportamento desejado com o modelo matemático.

O método implementado mostra particular sensibilidade à configuração atribuída ao EMA, quer na performance quer na qualidade dos resultados. Por regra, configurações mais exigentes produzem melhores resultados embora seja notória a maior morosidade na sua obtenção. A multiplicidade de recursos também interfere, claramente, na distribuição dos resultados observados. Nomeadamente, a existência da parcela do custo de manutenção não nula, quando há múltiplos recursos, manifesta-se pela maior frequência de resultados, tendencialmente, de custo (e tempo) menores.

De um modo geral, os resultados observam convergência para um limite inferior, quer no eixo do custo quer no eixo do tempo. Essa convergência aparenta falhar sempre que não se observam (ou são muito poucos) resultados suportando tempos de execução inferiores ou iguais ao prazo definido para a execução do projeto. Pode tratar-se de uma má especificação do projeto ao ser demasiado otimista na fixação daqueles prazos. Será necessário um estudo dedicado para aferir a validade desta conjectura. A confirmar-se, revelaria este modelo como uma ferramenta de assessoria àquele parâmetro; sendo, eventualmente, muito útil nos momentos mais primordiais do planeamento de projetos.

Trabalho Futuro

Um estudo estatístico mais formal aos resultados será útil. Nomeadamente, para determinação do resultado final. A aproximação usada através da seleção de resultados mais perto da média aritmética poderá sofrer de enviesamento. Além disso, entre as duas experiências, não se testou o comportamento da Macra para maior (nem menor) número de permutações válidas armazenadas aquando da compilação dos vários projetos.

Uma extensão imediata consiste em permitir que um recurso se torne, imediatamente após o término da sua utilidade numa atividade, elegível a ser atribuído a outra. Esta propriedade minimizaria o custo de manutenção.

O modelo apresentado apenas considera recursos totalmente renováveis. Outra ramificação deste trabalho será considerar a renovação parcial. Ou seja, assumir que algum recurso possa ser todo consumido antes de todas as atividades que dele necessitem terem sido iniciadas, implicando encargo adicional pela requisição de mais quantidade desses recursos durante a execução.

Ainda, como sugerido em Moutinho e Tereso (2014), o método atual, dada a boa correlação entre custo e tempo associado à rapidez de execução, poderá ser aplicável mesmo a projetos onde este, normalmente, possa não manifestar convergência.

Bibliografia

- Birbil, Ş. I. e Fang, S.-C. (2003), 'An electromagnetism-like mechanism for global optimization', *Journal of Global Optimization* **25**(3), 263–282.
- Birbil, Ş. I., Fang, S.-C. e Sheu, R.-L. (2004), 'On the convergence of a population-based global optimization algorithm', *Journal of Global Optimization* **30**(2), 301–318.
- Boctor, F. F. (1993), 'Heuristics for scheduling projects with resource restrictions and several resource-duration modes', *International Journal of Production Research* **31**(11), 2547–2558.
- Boctor, F. F. (1996), 'A new and efficient heuristic for scheduling projects with resource restrictions and multiple execution modes', *European Journal of Operational Research* **90**(2), 349–361.
- Bruni, M., Beraldi, P., Guerriero, F. e Pinto, E. (2011), 'A heuristic approach for resource constrained project scheduling with uncertain activity durations', *Computers & Operations Research* **38**(9), 1305 – 1318.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054810002947>
- Buddhakulsomsiri, J. e Kim, D. S. (2007), 'Priority rule-based heuristic for multi-mode resource-constrained project scheduling problems with resource vacations and activity splitting', *European Journal of Operational Research* **178**(2), 374 – 390.
- Costa, L. A. (2003), *Algoritmos Evolucionários em Optimização Uni e Multi-objectivo*, PhD thesis, Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- Deblaere, F., Demeulemeester, E. e Herroelen, W. (2011), 'Proactive policies for the stochastic resource-constrained project scheduling problem', *European Journal of Operational Research* **214**(2), 308 – 316.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221711003638>
- Demeulemeester, E. L. e Herroelen, W. S. (2002), *Project Scheduling - A Research Handbook*, Vol. 49 of *International Series in Operations Research & Management Science*, Kluwer Academic Publishers.
- Javadian, N., Gol Alikhani, M. e Tavakkoli-Moghaddam, R. (2008), A discrete binary version of the electromagnetism-like heuristic for solving traveling salesman problem, in D.-S. Huang, D. Wunsch, D. Levine e K.-H. Jo, eds, 'Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence', Vol. 5227 of *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin / Heidelberg, pp. 123–130.
- Johnson, S. M. (1954), 'Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included', *Naval Research Logistics Quarterly* **1**(1), 61–68.
- Moutinho, R. (2007), *Gestão de projectos – alocação de múltiplos recursos*, Relatório de estágio, Universidade do Minho.

- Moutinho, R. e Tereso, A. (2014), Scheduling of multimodal activities with multiple renewable and availability constrained resources under stochastic conditions, ProjMAN 2014 - International Conference on Project Management, Troia - Portugal.
- Sprecher, A., Hartmann, S. e Drexel, A. (1994), 'Project scheduling with discrete time-resource and resource-resource tradeoffs'.
- Sprecher, A., Hartmann, S. e Drexel, A. (1997), 'An exact algorithm for project scheduling with multiple modes', OR Spectrum **19**(3), 195–203.
- Stork, F. (2000), Branch-and-bound algorithms for stochastic resource-constrained project scheduling, Technical Report 702/2000, Technische Universität Berlin.
- Tereso, A., Araújo, M., Moutinho, R. e Elmaghraby, S. (2009a), Duration oriented resource allocation strategy on multiple resources projects under stochastic conditions, International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM' 2009), Montreal - Canada.
- Tereso, A., Araújo, M., Moutinho, R. e Elmaghraby, S. (2009b), Quantity oriented resource allocation strategy on multiple resources projects under stochastic conditions, International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM' 2009), Montreal - Canada.
- Tereso, A., Novais, R., Araújo, M. e Elmaghraby, S. (2009), 'Optimal resource allocation in stochastic activity networks via the electromagnetism approach: a platform implementation in java', Control and Cybernetics **38**(3), 745–782.
- Tereso, A. P. (2002), Gestão de Projectos – Alocação adaptativa de recursos em redes de actividades multimodais, PhD thesis, Universidade do Minho.
- Tereso, A. P., Araújo, M. M. T. e Elmaghraby, S. E. (2004a), 'Adaptive resource allocation in multimodal activity networks', International Journal of Production Economics **92**(1), 1–10.
- Tereso, A. P., Araújo, M. M. T. e Elmaghraby, S. E. (2004b), 'The optimal resource allocation in stochastic activity networks via the electromagnetism approach', Ninth International Workshop on Project Management and Scheduling (PMS'04) .
- Tereso, A. P., Araújo, M. M. T., Moutinho, R. e Elmaghraby, S. E. (2008), Project management: multiple resources allocation, International Conference on Engineering Optimization (EngOpt2008), Rio de Janeiro - Brazil. Full text published in the proceedings (ISBN 978857650156-5).
- Tereso, A. P., Costa, L. A., Novais, R. A. e Araújo, M. T. (2007), The optimal resource allocation in stochastic activity networks via the evolutionary approach: A platform implementation in java, International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM' 2007), Beijing, China. Full paper published in the proceedings (ISBN 978-7-89486-439-0).

Tereso, A. P., Mota, J. R. M. e Lameiro, R. J. T. (2006), 'Adaptive resource allocation to stochastic multimodal projects: A distributed platform implementation in java', *Control and Cybernetics Journal* **35**(3), 661–686.

Tsai, Y.-W. e Gemmill, D. D. (1998), 'Using tabu search to schedule activities of stochastic resource-constrained projects', *European Journal of Operational Research* **111**(1), 129 – 141.

Anexos

A. Projetos Testados

Este anexo contém a informação sobre o conjunto de projetos de teste, agrupados em 14 grupos. Cada grupo é composto por 4 projetos:

- ▶ 1 projeto com um único recurso, com restrição de disponibilidade máxima;
- ▶ 1 projeto com múltiplos recursos, cada um com restrição de disponibilidade;
- ▶ 1 projeto com um único recurso, sem restrição de disponibilidade;
- ▶ 1 projeto com múltiplos recursos, sem quaisquer restrições de disponibilidade.

Os projetos do mesmo grupo têm uma base comum: número e precedências de atividades; prazo de execução (T_D); custo unitário de atraso (c_L) ou bônus a aplicar (c_E), conforme o projeto termine depois ou antes do prazo. Os valores destes parâmetros encontram-se na tabela A.1.

Tabela A.1: Valores dos parâmetros comuns em cada grupo de projetos.

Grupo	T_D	c_L	c_E	Grupo	T_D	c_L	c_E
MP_Net01	16	2	0.2	MP_Net08	37	3	0.3
MP_Net02	120	8	0.8	MP_Net09	188	6	0.6
MP_Net03	66	5	0.5	MP_Net10	49	7	0.7
MP_Net04	105	4	0.4	MP_Net11	110	10	1.0
MP_Net05	28	8	0.8	MP_Net12	223	12	1.2
MP_Net06	65	5	0.5	MP_Net13	151	5	0.5
MP_Net07	47	4	0.4	MP_Net14	221	5	0.5

Cada secção seguinte, uma por cada grupo, organiza-se com:

- ▶ tabela síntese dos projetos do grupo;
- ▶ figura com as precedências das atividades, representada em rede AoA (Activity-on-Arc);
- ▶ tabela com informação sobre os recursos usados por projeto;
- ▶ tabela com os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso em cada atividade por projeto.

Em todos os quadros e figuras, adota-se a notação:

R número total de recursos;

iMr índice de multiplicidade do projeto;

K_r máxima disponibilidade do recurso r ;

c_r custo unitário da alocação do recurso r ;

i_r custo unitário do tempo de manutenção do recurso r ;

$\lambda_{a,r}$ parâmetro do conteúdo de trabalho associado ao recurso r , na atividade a .

A.1 Grupo de Projetos MP_Net01

No quadro A.2 encontra-se uma síntese com os nomes e propriedades dos projetos que compõem este grupo.

Tabela A.2: Síntese do grupo de projetos MP_Net01.

restrição de disponibilidade	único recurso			múltiplos recursos		
	nome	R	iMr	nome	R	iMr
com restrição	MP_Net01_1_5	1	0.00	MP_Net01_2_31	2	1.00
sem restrição	MP_Net01_1_NAC	1	0.00	MP_Net01_2_NAC	2	1.00

A relação de precedências partilhada por cada um dos projetos do grupo está representada na figura A.1.

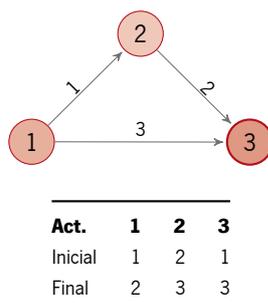


Figura A.1: Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net01.

As definições dos recursos figuram na tabela A.3 quer para as versões com ou sem restrição de disponibilidade.

Tabela A.3: Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net01. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

único recurso				múltiplos recursos			
r	K_r	c_r	i_r	r	K_r	c_r	i_r
1	5	2	0.4	1	3	1.5	0.3
				2	1.5	2	0.4

Os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados podem ser consultados na grelha A.4. As atividades que não usem algum dos recursos assinalam-se com uma entrada truncada na posição respetiva. Estes parâmetros coincidem nas versões com e sem restrição.

Tabela A.4: Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net01. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

a	único	múltiplos	
	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$
1	0.2	0.3	0.3
2	0.1	0.15	0.15
3	0.07	0.105	0.105

A.2 Grupo de Projetos MP_Net02

No quadro A.5 encontra-se uma síntese com os nomes e propriedades dos projetos que compõem este grupo.

Tabela A.5: Síntese do grupo de projetos MP_Net02.

restrição de disponibilidade	único recurso			múltiplos recursos		
	nome	R	iMr	nome	R	iMr
com restrição	MP_Net02_1_5	1	0.00	MP_Net02_4_3155	4	0.65
sem restrição	MP_Net02_1_NAC	1	0.00	MP_Net02_4_NAC	4	0.65

A relação de precedências partilhada por cada um dos projetos do grupo está representada na figura A.2.

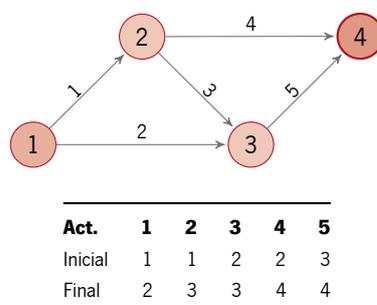


Figura A.2: Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net02.

As definições dos recursos figuram na tabela A.6 quer para as versões com ou sem restrição de disponibilidade.

Tabela A.6: Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net02. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

único recurso				múltiplos recursos			
r	K_r	c_r	i_r	r	K_r	c_r	i_r
1	5	1	0.2	1	3	2.5	0.5
				2	1.5	3	0.6
				3	5	3	0.6
				4	5	1.5	0.3

Os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados podem ser consultados na grelha A.7. As atividades que não usem algum dos recursos assinalam-se com uma entrada truncada na posição respetiva. Estes parâmetros coincidem nas versões com e sem restrição.

Tabela A.7: Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net02. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

<i>a</i>	único	múltiplos			
	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	$\lambda_{a,3}$	$\lambda_{a,4}$
1	0.02	0.02	—	—	—
2	0.03	0.0625	0.0625	0.0625	0.0625
3	0.04	0.0733	0.0733	0.0733	—
4	0.024	0.044	—	0.044	0.044
5	0.025	0.0375	0.0375	—	—

A.3 Grupo de Projetos MP_Net03

No quadro A.8 encontra-se uma síntese com os nomes e propriedades dos projetos que compõem este grupo.

Tabela A.8: Síntese do grupo de projetos MP_Net03.

restrição de disponibilidade	único recurso			múltiplos recursos		
	nome	R	iMr	nome	R	iMr
com restrição	MP_Net03_1_5	1	0.00	MP_Net03_2_15	2	0.93
sem restrição	MP_Net03_1_NAC	1	0.00	MP_Net03_2_NAC	2	0.93

A relação de precedências partilhada por cada um dos projetos do grupo está representada na figura A.3.

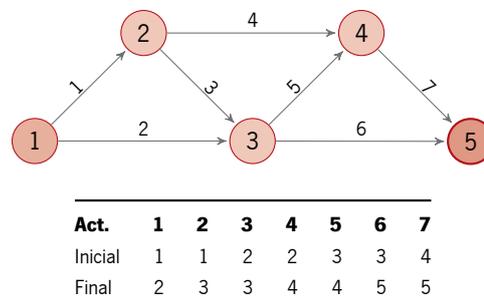


Figura A.3: Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net03.

As definições dos recursos figuram na tabela A.9 quer para as versões com ou sem restrição de disponibilidade.

Tabela A.9: Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net03. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

único recurso				múltiplos recursos			
r	K_r	c_r	i_r	r	K_r	c_r	i_r
1	5	1.5	0.3	1	1.5	1.5	0.3
				2	5	3	0.6

Os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados podem ser consultados na grelha A.10. As atividades que não usem algum dos recursos assinalam-se com uma entrada truncada na posição respetiva. Estes parâmetros coincidem nas versões com e sem restrição.

Tabela A.10: Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net03. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

a	único	múltiplos		a	único	múltiplos	
	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$		$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$
1	0.08	0.12	0.12	5	0.07	0.105	0.105
2	0.06	0.09	0.09	6	0.03	0.045	0.045
3	0.09	0.135	0.135	7	0.04	0.04	—
4	0.05	0.075	0.075				

A.4 Grupo de Projetos MP_Net04

No quadro A.11 encontra-se uma síntese com os nomes e propriedades dos projetos que compõem este grupo.

Tabela A.11: Síntese do grupo de projetos MP_Net04.

restrição de disponibilidade	único recurso			múltiplos recursos		
	nome	R	iMr	nome	R	iMr
com restrição	MP_Net04_1_1	1	0.00	MP_Net04_2_51	2	0.89
sem restrição	MP_Net04_1_NAC	1	0.00	MP_Net04_2_NAC	2	0.89

A relação de precedências partilhada por cada um dos projetos do grupo está representada na figura A.4.

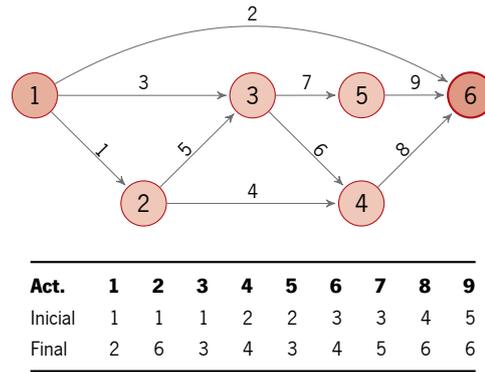


Figura A.4: Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net04.

As definições dos recursos figuram na tabela A.12 quer para as versões com ou sem restrição de disponibilidade.

Tabela A.12: Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net04. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

único recurso				múltiplos recursos			
r	K_r	c_r	i_r	r	K_r	c_r	i_r
1	1.5	2.5	0.5	1	5	3	0.6
				2	1.5	1	0.2

Os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados podem ser consultados na grelha A.13. As atividades que não usem algum dos recursos assinalam-se com uma entrada truncada na posição respetiva. Estes parâmetros coincidem nas versões com e sem restrição.

Tabela A.13: Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net04. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

a	único			a	múltiplos			a	único			a	múltiplos		
	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$												
1	0.04	0.06	0.06	4	0.035	0.035	—	7	0.045	0.0675	0.0675				
2	0.01	—	0.01	5	0.05	0.075	0.075	8	0.06	0.09	0.09				
3	0.07	0.105	0.105	6	0.06	0.09	0.09	9	0.039	0.0585	0.0585				

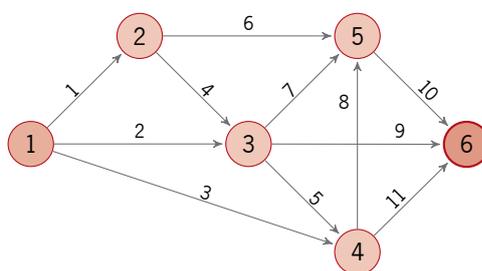
A.5 Grupo de Projetos MP_Net05

No quadro A.14 encontra-se uma síntese com os nomes e propriedades dos projetos que compõem este grupo.

Tabela A.14: Síntese do grupo de projetos MP_Net05.

restrição de disponibilidade	único recurso			múltiplos recursos		
	nome	R	iMr	nome	R	iMr
com restrição	MP_Net05_1_1	1	0.00	MP_Net05_3_333	3	0.79
sem restrição	MP_Net05_1_NAC	1	0.00	MP_Net05_3_NAC	3	0.79

A relação de precedências partilhada por cada um dos projetos do grupo está representada na figura A.5.



Act.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Inicial	1	1	1	2	3	2	3	4	3	5	4
Final	2	3	4	3	4	5	5	5	6	6	6

Figura A.5: Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net05.

As definições dos recursos figuram na tabela A.15 quer para as versões com ou sem restrição de disponibilidade.

Tabela A.15: Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net05. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

único recurso				múltiplos recursos			
r	K_r	c_r	i_r	r	K_r	c_r	i_r
1	1.5	2.5	0.5	1	3	2.5	0.5
				2	3	2	0.4
				3	3	2.5	0.5

Os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados podem ser consultados na grelha A.16. As atividades que não usem algum dos recursos assinalam-se com uma entrada truncada na posição respetiva. Estes parâmetros coincidem nas versões com e sem restrição.

Tabela A.16: Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net05. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

<i>a</i>	único	múltiplos			<i>a</i>	único	múltiplos		
	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	$\lambda_{a,3}$		$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	$\lambda_{a,3}$
1	0.1	0.15	0.15	—	7	0.4	0.7333	0.7333	0.7333
2	0.09	0.165	0.165	0.165	8	0.2	0.3667	0.3667	0.3667
3	0.4	0.7333	0.7333	0.7333	9	0.1	—	0.1	—
4	0.2	0.3667	0.3667	0.3667	10	0.3	0.45	—	0.45
5	0.3	0.55	0.55	0.55	11	0.3	—	0.45	0.45
6	0.08	—	0.08	—					

A.6 Grupo de Projetos MP_Net06

No quadro A.17 encontra-se uma síntese com os nomes e propriedades dos projetos que compõem este grupo.

Tabela A.17: Síntese do grupo de projetos MP_Net06.

restrição de disponibilidade	único recurso			múltiplos recursos		
	nome	R	iMr	nome	R	iMr
com restrição	MP_Net06_1_3	1	0.00	MP_Net06_3_531	3	0.64
sem restrição	MP_Net06_1_NAC	1	0.00	MP_Net06_3_NAC	3	0.64

A relação de precedências partilhada por cada um dos projetos do grupo está representada na figura A.6.

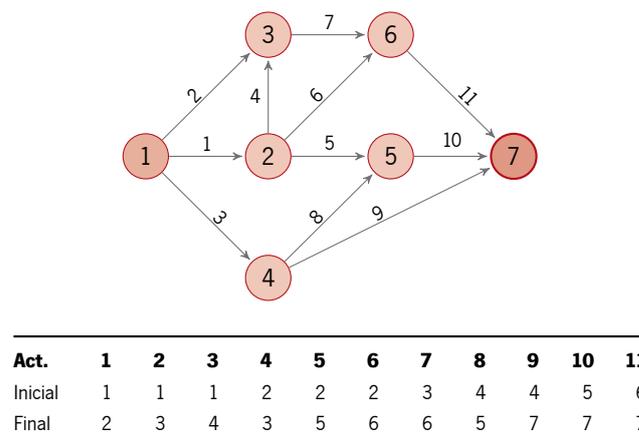


Figura A.6: Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net06.

As definições dos recursos figuram na tabela A.18 quer para as versões com ou sem restrição de disponibilidade.

Tabela A.18: Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net06. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

único recurso				múltiplos recursos			
r	K_r	c_r	i_r	r	K_r	c_r	i_r
1	3	2	0.4	1	5	2.5	0.5
				2	3	2.5	0.5
				3	1.5	1	0.2

Os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados podem ser consultados na grelha A.19. As atividades que não usem algum dos recursos assinalam-se com uma entrada truncada na posição respetiva. Estes parâmetros coincidem nas versões com e sem restrição.

Tabela A.19: Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net06. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

a	único				múltiplos				
	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	$\lambda_{a,3}$	a	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	$\lambda_{a,3}$
1	0.1	0.15	–	0.15	7	0.03	0.03	–	–
2	0.12	0.18	0.18	–	8	0.04	0.0733	0.0733	0.0733
3	0.05	0.075	–	0.075	9	0.024	0.036	0.036	–
4	0.08	–	0.08	–	10	0.15	0.275	0.275	0.275
5	0.2	0.3667	0.3667	0.3667	11	0.16	–	0.16	–
6	0.04	–	0.04	–					

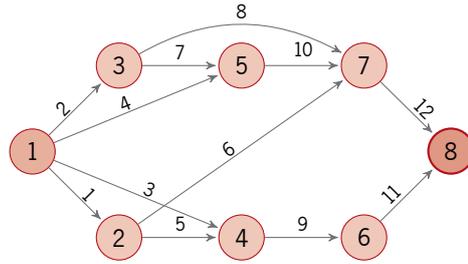
A.7 Grupo de Projetos MP_Net07

No quadro A.20 encontra-se uma síntese com os nomes e propriedades dos projetos que compõem este grupo.

Tabela A.20: Síntese do grupo de projetos MP_Net07.

restrição de disponibilidade	único recurso			múltiplos recursos		
	nome	R	iMr	nome	R	iMr
com restrição	MP_Net07_1_3	1	0.00	MP_Net07_4_3555	4	0.56
sem restrição	MP_Net07_1_NAC	1	0.00	MP_Net07_4_NAC	4	0.56

A relação de precedências partilhada por cada um dos projetos do grupo está representada na figura A.7.



Act.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Inicial	1	1	1	1	2	2	3	3	4	5	6	7
Final	2	3	4	5	4	7	5	7	6	7	8	8

Figura A.7: Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net07.

As definições dos recursos figuram na tabela A.21 quer para as versões com ou sem restrição de disponibilidade.

Tabela A.21: Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net07. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

único recurso				múltiplos recursos			
r	K_r	c_r	i_r	r	K_r	c_r	i_r
1	3	1.5	0.3	1	3	1	0.2
				2	5	1.5	0.3
				3	5	1.5	0.3
				4	5	1.5	0.3

Os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados podem ser consultados na grelha A.22. As atividades que não usem algum dos recursos assinalam-se com uma entrada truncada na posição respetiva. Estes parâmetros coincidem nas versões com e sem restrição.

Tabela A.22: Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net07. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

a	único	múltiplos				a	único	múltiplos			
	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	$\lambda_{a,3}$	$\lambda_{a,4}$		$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	$\lambda_{a,3}$	$\lambda_{a,4}$
1	0.1	0.2083	0.2083	0.2083	0.2083	7	0.1	0.1	—	—	—
2	0.09	0.09	—	—	—	8	0.09	0.09	—	—	—
3	0.08	0.12	—	—	0.12	9	0.08	0.1467	0.1467	0.1467	—
4	0.1	—	—	—	0.1	10	0.1	—	0.15	0.15	—
5	0.09	0.1875	0.1875	0.1875	0.1875	11	0.09	0.1875	0.1875	0.1875	0.1875
6	0.08	—	0.12	0.12	—	12	0.1	—	0.15	—	0.15

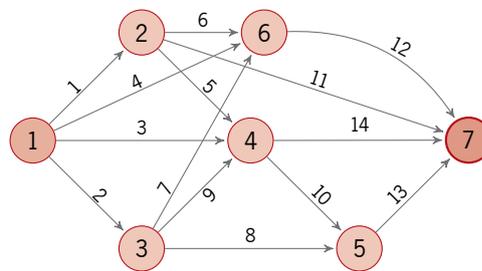
A.8 Grupo de Projetos MP_Net08

No quadro A.23 encontra-se uma síntese com os nomes e propriedades dos projetos que compõem este grupo.

Tabela A.23: Síntese do grupo de projetos MP_Net08.

restrição de disponibilidade	único recurso			múltiplos recursos		
	nome	R	iMr	nome	R	iMr
com restrição	MP_Net08_1_5	1	0.00	MP_Net08_3_315	3	0.69
sem restrição	MP_Net08_1_NAC	1	0.00	MP_Net08_3_NAC	3	0.69

A relação de precedências partilhada por cada um dos projetos do grupo está representada na figura A.8.



Act.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Inicial	1	1	1	1	2	2	3	3	3	4	2	6	5	4
Final	2	3	4	6	4	6	6	5	4	5	7	7	7	7

Figura A.8: Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net08.

As definições dos recursos figuram na tabela A.24 quer para as versões com ou sem restrição de disponibilidade.

Tabela A.24: Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net08. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

único recurso				múltiplos recursos			
r	K_r	c_r	i_r	r	K_r	c_r	i_r
1	5	1.5	0.3	1	3	3	0.6
				2	1.5	2.5	0.5
				3	5	2	0.4

Os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados podem ser consultados na grelha A.25. As atividades que não usem algum dos recursos assinalam-se com uma entrada truncada na posição respetiva. Estes parâmetros coincidem nas versões com e sem restrição.

Tabela A.25: Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net08. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

<i>a</i>	único	múltiplos			<i>a</i>	único	múltiplos		
	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	$\lambda_{a,3}$		$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	$\lambda_{a,3}$	
1	0.2	—	0.2	—	8	0.25	—	0.25	—
2	0.25	0.4583	0.4583	0.4583	9	0.2	—	0.2	—
3	0.16	0.24	—	0.24	10	0.08	0.1467	0.1467	0.1467
4	0.2	0.3	—	0.3	11	0.09	—	0.135	0.135
5	0.1	—	0.1	—	12	0.1	0.1833	0.1833	0.1833
6	0.16	0.2933	0.2933	0.2933	13	0.125	0.2292	0.2292	0.2292
7	0.5	0.75	—	0.75	14	0.1	—	0.15	0.15

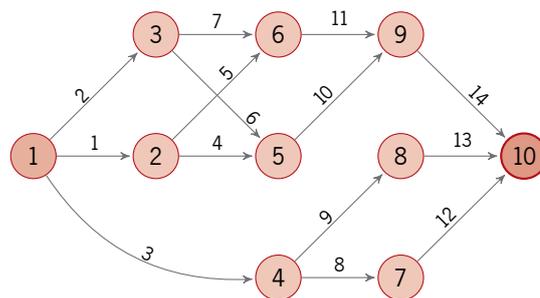
A.9 Grupo de Projetos MP_Net09

No quadro A.26 encontra-se uma síntese com os nomes e propriedades dos projetos que compõem este grupo.

Tabela A.26: Síntese do grupo de projetos MP_Net09.

restrição de disponibilidade	único recurso			múltiplos recursos		
	nome	R	iMr	nome	R	iMr
com restrição	MP_Net09_1_3	1	0.00	MP_Net09_3_311	3	0.74
sem restrição	MP_Net09_1_NAC	1	0.00	MP_Net09_3_NAC	3	0.74

A relação de precedências partilhada por cada um dos projetos do grupo está representada na figura A.9.



Act.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Inicial	1	1	1	2	2	3	3	4	4	5	6	7	8	9
Final	2	3	4	5	6	5	6	7	8	9	9	10	10	10

Figura A.9: Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net09.

As definições dos recursos figuram na tabela A.27 quer para as versões com ou sem restrição de disponibilidade.

Tabela A.27: Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net09. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

único recurso				múltiplos recursos			
r	K_r	c_r	i_r	r	K_r	c_r	i_r
1	3	1	0.2	1	3	3	0.6
				2	1.5	1.5	0.3
				3	1.5	2.5	0.5

Os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados podem ser consultados na grelha A.28. As atividades que não usem algum dos recursos assinalam-se com uma entrada truncada na posição respetiva. Estes parâmetros coincidem nas versões com e sem restrição.

Tabela A.28: Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net09. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

a	único				múltiplos				
	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	$\lambda_{a,3}$	a	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	$\lambda_{a,3}$
1	0.02	0.0367	0.0367	0.0367	8	0.06	—	0.06	—
2	0.03	0.045	—	0.045	9	0.03	0.055	0.055	0.055
3	0.04	—	0.06	0.06	10	0.02	0.0367	0.0367	0.0367
4	0.025	—	0.025	—	11	0.015	—	0.0225	0.0225
5	0.035	—	0.0525	0.0525	12	0.02	0.03	—	0.03
6	0.045	0.0825	0.0825	0.0825	13	0.025	—	0.025	—
7	0.05	0.0917	0.0917	0.0917	14	0.03	0.055	0.055	0.055

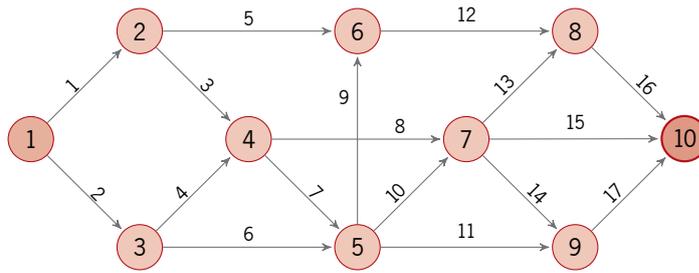
A.10 Grupo de Projetos MP_Net10

No quadro A.29 encontra-se uma síntese com os nomes e propriedades dos projetos que compõem este grupo.

Tabela A.29: Síntese do grupo de projetos MP_Net10.

restrição de disponibilidade	único recurso			múltiplos recursos		
	nome	R	iMr	nome	R	iMr
com restrição	MP_Net10_1_5	1	0.00	MP_Net10_2_33	2	0.88
sem restrição	MP_Net10_1_NAC	1	0.00	MP_Net10_2_NAC	2	0.88

A relação de precedências partilhada por cada um dos projetos do grupo está representada na figura A.10.



Act.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Inicial	1	1	2	3	2	3	4	4	5	5	5	6	7	7	7	8	9
Final	2	3	4	4	6	5	5	7	6	7	9	8	8	9	10	10	10

Figura A.10: Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net10.

As definições dos recursos figuram na tabela A.30 quer para as versões com ou sem restrição de disponibilidade.

Tabela A.30: Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net10. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

único recurso				múltiplos recursos			
r	K_r	c_r	i_r	r	K_r	c_r	i_r
1	5	2	0.4	1	3	1	0.2
				2	3	2.5	0.5

Os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados podem ser consultados na grelha A.31. As atividades que não usem algum dos recursos assinalam-se com uma entrada truncada na posição respetiva. Estes parâmetros coincidem nas versões com e sem restrição.

Tabela A.31: Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net10. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

a	único			múltiplos			a	único			múltiplos		
	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	a	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$		$\lambda_{a,2}$	a	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	
1	0.167	0.2505	0.2505	7	0.1	—	0.1	13	0.143	0.2145	0.2145		
2	0.1	0.15	0.15	8	0.333	0.4995	0.4995	14	0.5	0.75	0.75		
3	0.2	—	0.2	9	0.333	0.4995	0.4995	15	0.125	0.1875	0.1875		
4	0.1	0.15	0.15	10	0.25	0.375	0.375	16	0.167	0.2505	0.2505		
5	0.25	0.375	0.375	11	0.5	—	0.5	17	0.111	0.111	—		
6	0.2	0.3	0.3	12	0.167	0.2505	0.2505						

A.11 Grupo de Projetos MP_Net11

No quadro A.32 encontra-se uma síntese com os nomes e propriedades dos projetos que compõem este grupo.

Tabela A.32: Síntese do grupo de projetos MP_Net11.

restrição de disponibilidade	único recurso			múltiplos recursos		
	nome	R	iMr	nome	R	iMr
com restrição	MP_Net11_1_1	1	0.00	MP_Net11_4_1155	4	0.65
sem restrição	MP_Net11_1_NAC	1	0.00	MP_Net11_4_NAC	4	0.65

A relação de precedências partilhada por cada um dos projetos do grupo está representada na figura A.11.

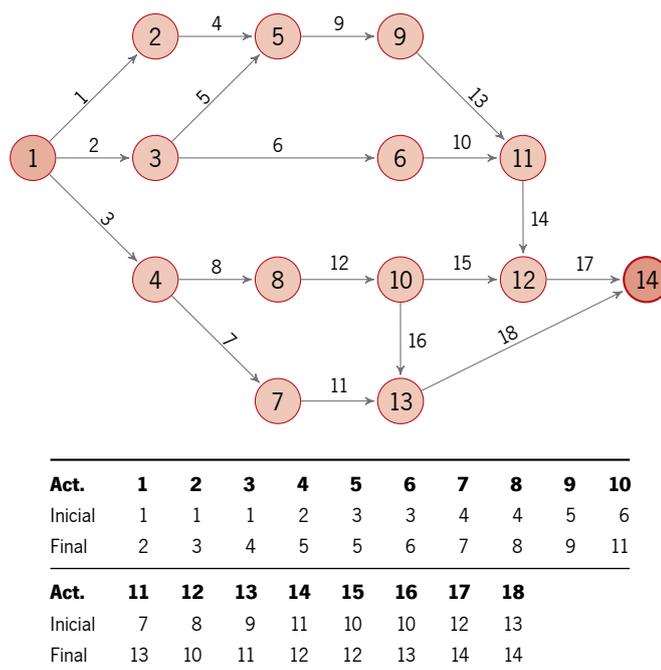


Figura A.11: Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net11.

As definições dos recursos figuram na tabela A.33 quer para as versões com ou sem restrição de disponibilidade.

Tabela A.33: Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net11. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

único recurso	múltiplos recursos			
	r	K_r	c_r	i_r
1	1.5	3	0.6	1 1.5 1 0.2
				2 1.5 3 0.6
				3 5 2.5 0.5
				4 5 3 0.6

Os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados podem ser consultados na grelha A.34. As atividades que não usem algum dos recursos assinalam-se com uma entrada truncada na posição respetiva. Estes parâmetros coincidem nas versões com e sem restrição.

Tabela A.34: Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net11. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

<i>a</i>	único					<i>a</i>	múltiplos				
	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	$\lambda_{a,3}$	$\lambda_{a,4}$		$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	$\lambda_{a,3}$	$\lambda_{a,4}$
1	0.06	0.125	0.125	0.125	0.125	10	0.05	—	0.05	—	—
2	0.04	0.06	—	0.06	—	11	0.08	—	0.1467	0.1467	0.1467
3	0.1	0.2083	0.2083	0.2083	0.2083	12	0.07	0.1458	0.1458	0.1458	0.1458
4	0.07	—	—	0.07	—	13	0.09	0.165	0.165	0.165	—
5	0.08	—	—	0.12	0.12	14	0.09	—	0.165	0.165	0.165
6	0.04	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	15	0.05	0.075	0.075	—	—
7	0.08	—	0.08	—	—	16	0.09	0.165	0.165	—	0.165
8	0.2	0.3	—	—	0.3	17	0.04	0.06	—	0.06	—
9	0.07	0.1458	0.1458	0.1458	0.1458	18	0.06	—	0.09	0.09	—

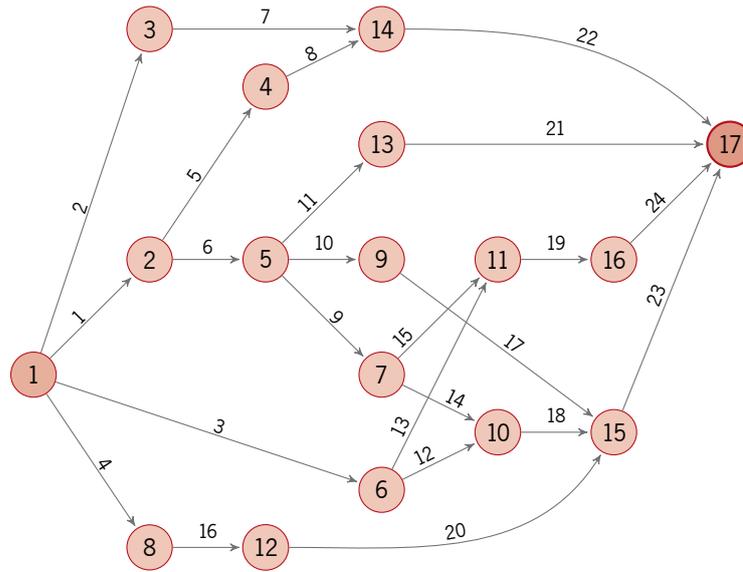
A.12 Grupo de Projetos MP_Net12

No quadro A.35 encontra-se uma síntese com os nomes e propriedades dos projetos que compõem este grupo.

Tabela A.35: Síntese do grupo de projetos MP_Net12.

restrição de disponibilidade	único recurso			múltiplos recursos		
	nome	R	iMr	nome	R	iMr
com restrição	MP_Net12_1_5	1	0.00	MP_Net12_2_13	2	0.83
sem restrição	MP_Net12_1_NAC	1	0.00	MP_Net12_2_NAC	2	0.83

A relação de precedências partilhada por cada um dos projetos do grupo está representada na figura A.12.



Act.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Inicial	1	1	1	1	2	2	3	4	5	5	5	6	6
Final	2	3	6	8	4	5	14	14	7	9	13	10	11

Act.	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Inicial	7	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Final	10	11	12	15	15	16	15	17	17	17	17

Figura A.12: Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net12.

As definições dos recursos figuram na tabela A.36 quer para as versões com ou sem restrição de disponibilidade.

Tabela A.36: Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net12. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

único recurso				múltiplos recursos			
r	K_r	c_r	i_r	r	K_r	c_r	i_r
1	5	1.5	0.3	1	1.5	2	0.4
				2	3	2	0.4

Os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados podem ser consultados na grelha A.37. As atividades que não usem algum dos recursos assinalam-se com uma entrada truncada na posição respetiva. Estes parâmetros coincidem nas versões com e sem restrição.

Tabela A.37: Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net12. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

<i>a</i>	único		múltiplos		<i>a</i>	único		múltiplos		<i>a</i>	único		múltiplos	
	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$			$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$			$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	
1	0.025	0.0375	0.0375		9	0.0333	–	0.0333		17	0.05	–	0.05	
2	0.02	0.03	0.03		10	0.025	–	0.025		18	0.0556	0.0556	–	
3	0.0222	0.0333	0.0333		11	0.02	0.03	0.03		19	0.0278	0.0417	0.0417	
4	0.0182	0.0273	0.0273		12	0.0385	0.0385	–		20	0.0222	–	0.0222	
5	0.0333	0.0333	–		13	0.0357	0.0536	0.0536		21	0.0667	0.1001	0.1001	
6	0.0286	–	0.0286		14	0.05	0.075	0.075		22	0.0167	0.0251	0.0251	
7	0.025	0.0375	0.0375		15	0.04	0.06	0.06		23	0.04	0.06	0.06	
8	0.04	0.06	0.06		16	0.0333	0.05	0.05		24	0.0217	0.0326	0.0326	

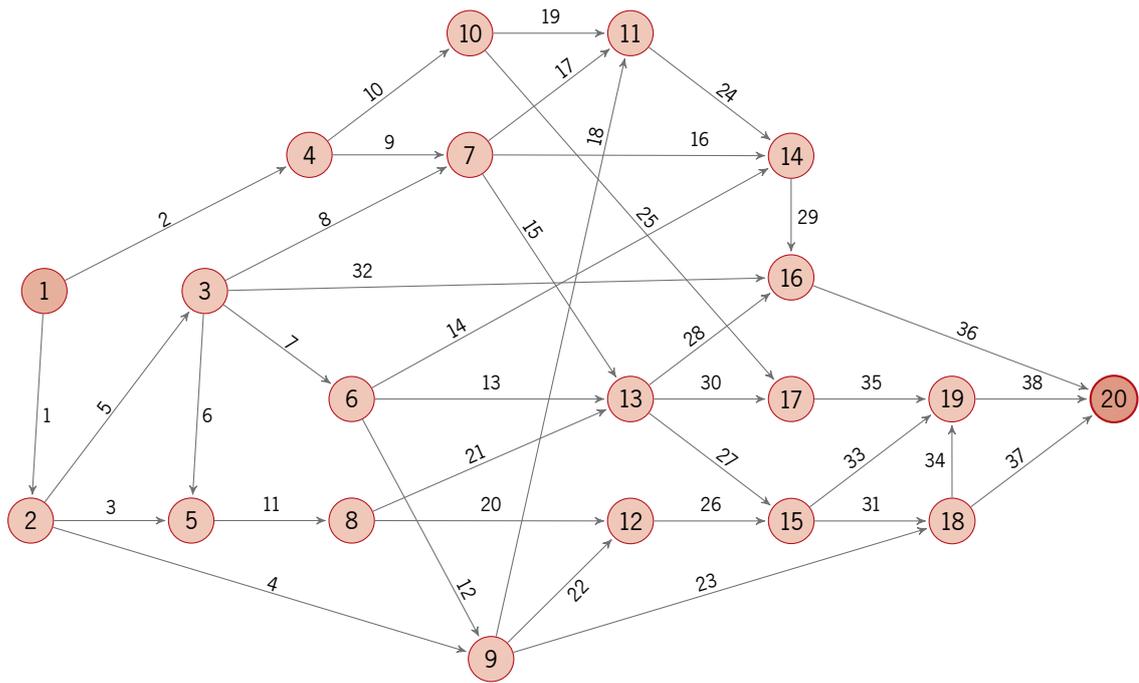
A.13 Grupo de Projetos MP_Net13

No quadro A.38 encontra-se uma síntese com os nomes e propriedades dos projetos que compõem este grupo.

Tabela A.38: Síntese do grupo de projetos MP_Net13.

restrição de disponibilidade	único recurso			múltiplos recursos		
	nome	R	iMr	nome	R	iMr
com restrição	MP_Net13_1_1	1	0.00	MP_Net13_2_31	2	0.91
sem restrição	MP_Net13_1_NAC	1	0.00	MP_Net13_2_NAC	2	0.91

A relação de precedências partilhada por cada um dos projetos do grupo está representada na figura A.13.



Act.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Inicial	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	5	6	6
Final	2	4	5	9	3	5	6	7	7	10	8	9	13
Act.	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Inicial	6	7	7	7	9	10	8	8	9	9	11	10	12
Final	14	13	14	11	11	11	12	13	12	18	14	17	15
Act.	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	
Inicial	13	13	14	13	15	3	15	18	17	16	18	19	
Final	15	16	16	17	18	16	19	19	19	20	20	20	

Figura A.13: Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net13.

As definições dos recursos figuram na tabela A.39 quer para as versões com ou sem restrição de disponibilidade.

Tabela A.39: Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net13. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

único recurso				múltiplos recursos			
r	K_r	c_r	i_r	r	K_r	c_r	i_r
1	1.5	2.5	0.5	1	3	2.5	0.5
				2	1.5	2.5	0.5

Os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados podem ser consultados na grelha A.40. As atividades que não usem algum dos recursos assinalam-se com uma entrada truncada na posição respetiva. Estes parâmetros coincidem nas versões com e sem restrição.

Tabela A.40: Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net13. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

<i>a</i>	único		múltiplos		<i>a</i>	único		múltiplos		<i>a</i>	único		múltiplos	
	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$			$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$			$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	
1	0.0625	0.0938	0.0938		14	0.125	0.1875	0.1875		27	0.0625	0.0938	0.0938	
2	0.0333	0.05	0.05		15	0.7143	1.0715	1.0715		28	0.0833	0.125	0.125	
3	0.0625	0.0938	0.0938		16	0.0476	0.0714	0.0714		29	0.0555	0.0833	0.0833	
4	0.05	0.075	0.075		17	0.0625	0.0938	0.0938		30	0.0417	0.0417	—	
5	0.1	0.15	0.15		18	0.05	—	0.05		31	0.0909	0.1364	0.1364	
6	0.0556	0.0834	0.0834		19	0.0526	0.0789	0.0789		32	0.0909	0.1364	0.1364	
7	0.0667	0.1001	0.1001		20	0.0588	0.0882	0.0882		33	0.0455	0.0683	0.0683	
8	0.0909	0.1364	0.1364		21	0.0667	0.1001	0.1001		34	0.0417	0.0626	0.0626	
9	0.0833	—	0.0833		22	0.0555	0.0833	0.0833		35	0.0333	0.05	0.05	
10	0.025	0.0375	0.0375		23	0.0476	0.0714	0.0714		36	0.0667	0.0667	—	
11	0.05	0.075	0.075		24	0.0625	0.0625	—		37	0.125	0.1875	0.1875	
12	0.0625	0.0938	0.0938		25	0.05	—	0.05		38	0.1	0.15	0.15	
13	0.1	0.15	0.15		26	0.0555	—	0.0555						

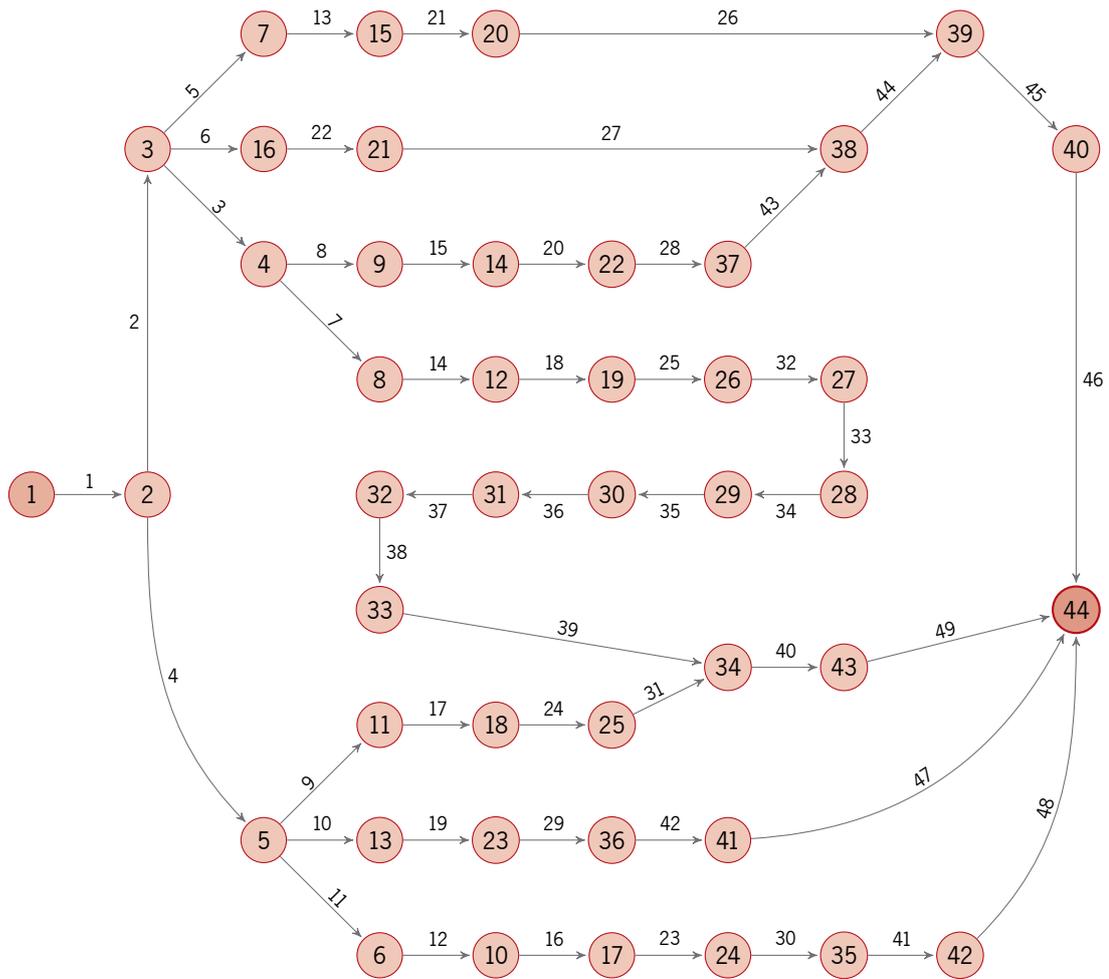
A.14 Grupo de Projetos MP_Net14

No quadro A.41 encontra-se uma síntese com os nomes e propriedades dos projetos que compõem este grupo.

Tabela A.41: Síntese do grupo de projetos MP_Net14.

restrição de disponibilidade	único recurso			múltiplos recursos		
	nome	R	iMr	nome	R	iMr
com restrição	MP_Net14_1_5	1	0.00	MP_Net14_2_31	2	0.87
sem restrição	MP_Net14_1_NAC	1	0.00	MP_Net14_2_NAC	2	0.87

A relação de precedências partilhada por cada um dos projetos do grupo está representada na figura A.14.



Act.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Inicial	1	2	3	2	3	3	4	4	5	5	5	6	7	8	9	10	11
Final	2	3	4	5	7	16	8	9	11	13	6	10	15	12	14	17	18
Act.	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Inicial	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Final	19	23	22	20	21	24	25	26	39	38	37	36	35	34	27	28	29
Act.	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49		
Inicial	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43		
Final	30	31	32	33	34	43	42	41	38	39	40	44	44	44	44		

Figura A.14: Rede AoA de precedências das atividades para o grupo MP_Net14.

As definições dos recursos figuram na tabela A.42 quer para as versões com ou sem restrição de disponibilidade.

Tabela A.42: Informação dos recursos no grupo de projetos MP_Net14. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

único recurso				múltiplos recursos			
r	K_r	c_r	i_r	r	K_r	c_r	i_r
1	5	2	0.4	1	3	3	0.6
				2	1.5	2	0.4

Os parâmetros dos conteúdos de trabalho associados podem ser consultados na grelha A.43. As atividades que não usem algum dos recursos assinalam-se com uma entrada truncada na posição respetiva. Estes parâmetros coincidem nas versões com e sem restrição.

Tabela A.43: Parâmetros dos conteúdos de trabalho associados a cada recurso, em cada atividade, para o grupo de projetos MP_Net14. As versões sem restrição de disponibilidade partilham os mesmos parâmetros que as suas homólogas.

a	único			múltiplos			a	único			múltiplos		
	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	a	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$		$\lambda_{a,2}$	a	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,1}$	$\lambda_{a,2}$	
1	0.01	0.015	0.015	18	0.33	0.495	0.495	35	0.09	0.135	0.135		
2	0.125	—	0.125	19	0.1	0.15	0.15	36	0.14	0.21	0.21		
3	0.25	—	0.25	20	0.44	0.66	0.66	37	0.5	0.75	0.75		
4	0.16	0.24	0.24	21	0.14	0.21	0.21	38	0.33	—	0.33		
5	0.11	0.165	0.165	22	0.12	0.18	0.18	39	0.33	0.33	—		
6	0.125	0.1875	0.1875	23	0.33	0.495	0.495	40	0.08	0.12	0.12		
7	0.11	0.165	0.165	24	0.2	0.2	—	41	0.13	0.195	0.195		
8	0.2	—	0.2	25	0.11	0.165	0.165	42	0.09	0.135	0.135		
9	0.16	0.24	0.24	26	0.13	0.195	0.195	43	0.33	0.33	—		
10	0.11	0.165	0.165	27	0.14	0.21	0.21	44	0.13	0.195	0.195		
11	0.14	—	0.14	28	0.5	0.75	0.75	45	0.5	0.75	0.75		
12	0.5	0.75	0.75	29	0.2	0.3	0.3	46	0.15	0.15	—		
13	0.33	0.33	—	30	0.16	0.24	0.24	47	0.5	0.75	0.75		
14	0.2	0.3	0.3	31	0.14	0.14	—	48	0.14	0.21	0.21		
15	0.3	0.45	0.45	32	0.09	0.135	0.135	49	0.13	0.195	0.195		
16	0.4	0.4	—	33	0.14	0.21	0.21						
17	0.5	0.5	—	34	0.14	0.21	0.21						

B. Valor Esperado do Máximo de Variáveis Aleatórias Exponencialmente Distribuídas e Independentes

Considere-se as variáveis aleatórias independentes $X_i \sim \text{Exp}(\lambda_i)$, $i = 1, \dots, n$. Quer-se determinar o valor esperado da variável aleatória $Y_n = \max_{i=1}^n X_i$.

Seja $F_{Y_n}(y)$ a função de distribuição de Y_n . Dado que as X_i são independentes, vem que:

$$F_{Y_n}(y) = P[X_1 \leq y, \dots, X_n \leq y] = \prod_{i=1}^n F_{X_i}(y), \quad y > 0 \quad (\text{B.1})$$

onde $F_{X_i}(x) = 1 - e^{-\lambda_i x}$, $x > 0$ é a função de distribuição para X_i .

O valor esperado de Y_n , denotado por $\mathcal{E}[Y_n]$, será obtido por:

$$\mathcal{E}[Y_n] = \int_0^{+\infty} y f_{Y_n}(y) dy \quad (\text{B.2})$$

onde $f_{Y_n}(y) = F'_{Y_n}(y)$ é a função densidade de probabilidade de Y_n .

Para o caso trivial $n = 1$, resulta o valor esperado de uma variável aleatória exponencial de parâmetro λ_1 , ou seja:

$$\mathcal{E}[Y_1] = \frac{1}{\lambda_1} \quad (\text{B.3})$$

Para valores superiores de n , o cálculo torna-se mais laborioso. Para $n = 2$ e $n = 3$, obtém-se:

$$\mathcal{E}[Y_2] = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2} \quad (\text{B.4})$$

$$\mathcal{E}[Y_3] = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_3} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (\text{B.5})$$

Se se assumir que cada uma das $X_i \sim \text{Exp}(\lambda)$, ou seja, $\lambda = \lambda_i = \lambda_j$, $\forall i, j \in \{1, \dots, n\}$, obtém-se um problema mais simples. Neste caso, os valores esperados para os casos $n = 1, 2, 3, 4$ são:

$$\mathcal{E}[Y_1] = \frac{1}{\lambda} \quad \mathcal{E}[Y_2] = \frac{3}{2\lambda} \quad \mathcal{E}[Y_3] = \frac{11}{6\lambda} \quad \mathcal{E}[Y_4] = \frac{25}{12\lambda} \quad (\text{B.6})$$

C. Listagem de Resultados

Os resultados consistem na recolha de todos os resultados intermédios (um por amostra de conteúdos de trabalho) e estão distribuídos em três quadros: um comparativo entre os obtidos por cada configuração e dois com o escalonamento e alocação para os projetos com único e com múltiplos recursos, para a configuração DD (Default-Default). Nos quadros comparativos, identifica-se os intervalos de confiança a 95% para as médias do tempo de execução (T) e custo total (C) e respetivo tamanho da amostra (n); bem como, o tempo médio de obtenção de cada resultado intermédio (Δ_t), em segundos.

Índice Hierárquico dos Quadros Listados

expA (Experiência A)

MP_Net01

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.1	pág. 88
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.2	pág. 88
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.3	pág. 88

MP_Net02

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.4	pág. 89
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.5	pág. 89
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.6	pág. 89

MP_Net03

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.7	pág. 90
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.8	pág. 90
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.9	pág. 90

MP_Net04

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.10	pág. 91
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.11	pág. 91
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.12	pág. 91

MP_Net05

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.13	pág. 92
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.14	pág. 92
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.15	pág. 93

MP_Net06

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.16	pág. 93
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.17	pág. 94
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.18	pág. 94

MP_Net07

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.19	pág. 95
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.20	pág. 95
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.21	pág. 96

MP_Net08

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.22	pág. 96
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.23	pág. 97
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.24	pág. 97

MP_Net09

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.25	pág. 98
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.26	pág. 98
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.27	pág. 99

MP_Net10

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.28	pág. 99
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.29	pág. 100
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.30	pág. 100

MP_Net11

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.31	pág. 101
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.32	pág. 101
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.33	pág. 102

MP_Net12

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.34	pág. 102
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.35	pág. 103
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.36	pág. 103

MP_Net13

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.37	pág. 104
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.38	pág. 104
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.39	pág. 105

MP_Net14

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.40	pág. 105
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.41	pág. 106
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.42	pág. 107

expB (Experiência B)

MP_Net01

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.43	pág. 108
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.44	pág. 108
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.45	pág. 108

MP_Net02

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.46	pág. 109
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.47	pág. 109
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.48	pág. 109

MP_Net03

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.49	pág. 110
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.50	pág. 110
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.51	pág. 110

MP_Net04

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.52	pág. 111
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.53	pág. 111
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.54	pág. 111

MP_Net05

Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.55	pág. 112
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.56	pág. 112
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.57	pág. 113

MP_Net06

Comparativo de resultados médios entre configurações	Tab. C.58	pág. 113
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso	Tab. C.59	pág. 114
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.60	pág. 114
MP_Net07		
Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.61	pág. 115
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.62	pág. 115
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.63	pág. 116
MP_Net08		
Comparativo de resultados médios entre configurações	Tab. C.64	pág. 116
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.65	pág. 117
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.66	pág. 117
MP_Net09		
Comparativo de resultados médios entre configurações	Tab. C.67	pág. 118
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.68	pág. 118
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos.....	Tab. C.69	pág. 119
MP_Net10		
Comparativo de resultados médios entre configurações	Tab. C.70	pág. 119
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.71	pág. 120
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos	Tab. C.72	pág. 120
MP_Net11		
Comparativo de resultados médios entre configurações	Tab. C.73	pág. 121
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso	Tab. C.74	pág. 121
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos	Tab. C.75	pág. 122
MP_Net12		
Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.76	pág. 122
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso	Tab. C.77	pág. 123
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos	Tab. C.78	pág. 123
MP_Net13		
Comparativo de resultados médios entre configurações	Tab. C.79	pág. 124
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso.....	Tab. C.80	pág. 124
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos	Tab. C.81	pág. 125
MP_Net14		
Comparativo de resultados médios entre configurações.....	Tab. C.82	pág. 125
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – único recurso	Tab. C.83	pág. 126
Alocação e escalonamento, para a configuração DD – múltiplos recursos	Tab. C.84	pág. 127

C.1 Listagem para a expA

Tabela C.1: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net01, na expA.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(\text{s})$
<i>MP_Net01_1_5</i>				
DD	]24.812, 24.984[	]67.993, 68.739[	95611	0.250
DL	]24.631, 25.032[	]67.343, 69.084[	17681	0.118
LD	]23.889, 24.434[	]70.94, 73.32[	10000	0.009
LL	]23.668, 24.206[	]69.801, 72.109[	10000	0.004
<i>MP_Net01_2_31</i>				
DD	]25.004, 25.232[	]84.214, 85.206[	40000	0.284
DL	]25.03, 25.49[	]84.088, 86.09[	10000	0.051
LD	]27.019, 27.52[	]94.283, 96.471[	10000	0.008
LL	]26.812, 27.281[	]93.54, 95.591[	11000	0.005

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.2: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_1_5, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	0.5	1	0	1
2	0.5	9	1	9
3	0.96	25	0	25

$T = 25$ $C = 68.37$

Tabela C.3: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_2_31, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	0.77	16	0.56	7	0	16
2	1.34	9	1.45	1	16	9
3	0.73	14	0.88	4	0	14

$T = 25$ $C = 84.7$

Tabela C.4: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net02, na expA.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net02_1_5</i>				
DD	]116.143, 116.741[	]293.39, 298.561[	66813	0.131
DL	]116.304, 117.866[	]293.972, 307.583[	10000	0.122
LD	]122.442, 124.555[	]353.698, 370.664[	10000	0.010
LL	]122.187, 124.262[	]348.841, 365.428[	10000	0.005
<i>MP_Net02_4_3155</i>				
DD	]121.987, 123.021[	]917.463, 931.701[	19002	0.388
DL	]121.289, 122.74[	]911.133, 931.135[	10000	0.087
LD	]126.891, 128.617[	]967.066, 987.933[	10000	0.022
LL	]125.7, 127.407[	]956.224, 977.069[	10000	0.008

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.5: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_1_5, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.16	36	0	36
2	0.57	5	0	5
3	1.15	57	36	57
4	1.47	80	36	80
5	0.7	9	93	9

T = 116 C = 295.78

Tabela C.6: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_4_3155, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	$x_{a,4}$	$Y_{a,4}$	s_a	Y_a
1	1.05	62	—	—	—	—	—	—	0	62
2	1.2	55	1.37	5	1.13	4	0.53	17	0	55
3	1.34	5	0.88	1	0.92	28	—	—	62	28
4	1.49	16	—	—	0.72	12	0.71	18	62	18
5	0.61	13	1.3	32	—	—	—	—	90	32

T = 122 C = 924.37

Tabela C.7: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net03, na expA.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net03_1_5</i>				
DD	]76.813, 77.235[	]290.022, 293.793[	47821	0.333
DL	]76.497, 77.438[	]287.14, 295.47[	10000	0.125
LD	]80.969, 82.13[	]308.425, 317.318[	10000	0.010
LL	]80.801, 81.949[	]307.162, 315.916[	10000	0.005
<i>MP_Net03_2_15</i>				
DD	]107.27, 108.013[	]605.05, 611.157[	33016	0.274
DL	]107.207, 108.568[	]604.606, 615.805[	10000	0.069
LD	]114.436, 115.942[	]650.536, 662.601[	10000	0.017
LL	]114.649, 116.156[	]652.879, 664.945[	10000	0.007

* intervalo de confiança a 95%; n : tamanho da amostra; Δ_t : tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.8: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net03_1_5, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.5	11	0	11	5	0.9	17	26	17
2	1.12	17	0	17	6	1.13	51	26	51
3	0.5	15	11	15	7	0.5	15	54	15
4	0.83	43	11	43					

$T = 77 \quad C = 291.82$

Tabela C.9: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net03_2_15, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	1.14	4	1.26	1	0	4	5	0.72	1	0.89	3	22	3
2	0.81	9	1.47	7	13	9	6	0.77	19	0.86	86	22	86
3	1.28	4	1.27	9	4	9	7	0.73	43	—	—	25	43
4	0.6	9	1.27	3	13	9							

$T = 108 \quad C = 607.77$

Tabela C.10: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net04, na expA.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net04_1_1</i>				
DD	]226.875, 230.459[	]1039.66, 1062.59[	13315	1.048
DL	]231.161, 235.391[	]1057.61, 1084.58[	10000	0.296
LD	]233.203, 237.12[	]1143.3, 1169.92[	11000	0.022
LL	]233.679, 237.886[	]1140.3, 1168.8[	10000	0.010
<i>MP_Net04_2_51</i>				
DD	]197.62, 200.25[	]960.284, 976.233[	15717	0.469
DL	]200.063, 203.374[	]973.725, 993.76[	10000	0.114
LD	]207.797, 211.285[	]1024.97, 1045.86[	10000	0.029
LL	]207.149, 210.583[	]1020.25, 1040.78[	10000	0.010

** intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).*

Tabela C.11: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net04_1_1, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.23	14	0	14	6	0.88	3	199	3
2	0.84	164	14	164	7	1.35	11	188	11
3	1.5	3	185	3	8	0.59	11	199	11
4	1.5	7	178	7	9	0.84	27	202	27
5	0.5	98	14	98					

$T = 229 \quad C = 1050.2$

Tabela C.12: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net04_2_51, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	0.97	13	0.76	15	0	15	6	1.01	4	1.38	5	155	5
2	—	—	1.48	105	50	105	7	0.95	26	0.89	8	160	26
3	1.01	4	1.07	21	15	21	8	1.17	8	1.33	1	190	8
4	1.5	9	—	—	15	9	9	0.67	2	0.52	30	160	30
5	1.15	9	1.39	14	36	14							

$T = 198 \quad C = 968.8$

Tabela C.13: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net05, na expA.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(\text{s})$
<i>MP_Net05_1_1</i>				
DD	]58.135, 58.356[	]406.174, 408.611[	119172	0.266
DL	]58.132, 58.882[	]406.308, 414.632[	10000	0.200
LD	]60.746, 61.552[	]439.311, 448.245[	10000	0.021
LL	]61.31, 62.13[	]444.835, 453.925[	10000	0.008
<i>MP_Net05_3_333</i>				
DD	]34.936, 35.066[	]302.717, 304.557[	77110	0.343
DL	]35.135, 35.498[	]303.827, 308.963[	10000	0.086
LD	]36.561, 36.975[	]313.695, 319.045[	10000	0.030
LL	]36.74, 37.145[	]315.121, 320.456[	10000	0.009

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.14: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net05_1_1, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	0.97	10	11	10	7	0.5	9	25	9
2	1.36	11	0	11	8	0.5	22	25	22
3	0.5	7	11	7	9	0.96	1	44	1
4	0.78	4	21	4	10	1.5	2	49	2
5	0.5	19	25	19	11	1.5	7	51	7
6	1.5	2	47	2					

$$T = 58 \quad C = 407.38$$

Tabela C.15: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net05_3_333, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	s_a	Y_a
1	0.98	3	0.99	11	—	—	0	11
2	0.93	1	1.34	18	1.03	9	0	18
3	1.46	2	0.98	2	1.18	1	16	2
4	0.89	4	1.09	1	0.86	1	12	4
5	0.66	4	0.53	2	0.75	2	18	4
6	—	—	0.91	1	—	—	11	1
7	1.28	1	1.07	3	1.38	1	18	3
8	—	—	1.49	8	—	—	26	8
9	1.16	2	0.94	1	0.73	4	22	4
10	0.65	4	—	—	1.0	1	26	4
11	—	—	0.7	13	1.02	2	22	13

$T = 35 \quad C = 303.66$

Tabela C.16: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net06, na expA.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	Δ_t (s)
<i>MP_Net06_1_3</i>				
DD	]91.049, 91.708[	]526.82, 533.255[	34973	0.370
DL	]91.208, 92.429[	]523.209, 535.016[	10000	0.086
LD	]93.736, 95.08[	]547.091, 559.441[	10000	0.025
LL	]94.256, 95.6[	]545.451, 557.802[	10000	0.009
<i>MP_Net06_3_531</i>				
DD	]89.477, 90.245[	]718.279, 727.002[	18600	0.674
DL	]91.058, 92.085[	]722.004, 733.668[	10906	0.100
LD	]92.689, 93.84[	]735.832, 747.998[	10000	0.044
LL	]95.225, 96.425[	]753.17, 765.484[	10000	0.010

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.17: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net06_1_3, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.02	24	0	24	7	1.14	38	40	38
2	1.27	16	24	16	8	1.32	4	74	4
3	0.83	49	0	49	9	1.36	20	49	20
4	0.69	10	24	10	10	1.19	5	69	5
5	0.79	2	34	2	11	0.8	13	78	13
6	0.73	11	36	11					

T = 91 C = 529.95

Tabela C.18: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net06_3_531, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	s_a	Y_a
1	0.5	13	—	—	0.53	6	0	13
2	0.5	11	1.5	5	—	—	0	11
3	1.5	8	—	—	1.19	10	13	10
4	—	—	1.34	1	—	—	13	1
5	0.63	1	1.02	4	0.5	19	67	19
6	—	—	0.62	67	—	—	13	67
7	0.67	42	—	—	—	—	14	42
8	0.57	26	0.5	26	—	—	23	26
9	1.46	44	0.74	28	1.5	9	23	44
10	1.09	1	1.46	1	0.5	4	86	4
11	—	—	1.04	1	—	—	80	1

T = 90 C = 722.16

Tabela C.19: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net07, na expA.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(\text{s})$
<i>MP_Net07_1_3</i>				
DD	]62.468, 62.635[	]261.929, 263.167[	155070	0.377
DL	]63.495, 64.184[	]265.793, 270.821[	10000	0.083
LD	]64.343, 65.062[	]272.091, 277.074[	10000	0.030
LL	]65.537, 66.291[	]275.943, 281.104[	10000	0.009
<i>MP_Net07_4_3555</i>				
DD	]56.033, 56.346[	]319.806, 322.372[	22261	0.467
DL	]56.525, 57.005[	]322.152, 326.064[	10000	0.098
LD	]58.592, 59.13[	]330.924, 334.95[	10000	0.028
LL	]59.326, 59.881[	]333.318, 337.398[	10000	0.008

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.20: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net07_1_3, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	0.95	13	9	13	7	0.58	36	8	36
2	1.18	8	0	8	8	1.0	9	34	9
3	1.28	27	0	27	9	0.69	3	34	3
4	0.85	1	8	1	10	1.09	2	44	2
5	1.33	7	27	7	11	0.76	20	43	20
6	0.64	23	22	23	12	0.85	17	46	17

$$T = 63 \quad C = 262.54$$

Tabela C.21: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net07_4_3555, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	$x_{a,4}$	$Y_{a,4}$	s_a	Y_a
1	1.1	7	0.86	3	1.31	1	1.43	2	0	7
2	1.29	9	—	—	—	—	—	—	0	9
3	1.5	6	—	—	—	—	0.96	3	7	6
4	—	—	—	—	—	—	0.97	1	0	1
5	0.73	8	1.25	3	0.63	6	0.93	11	13	11
6	—	—	1.4	17	0.65	27	—	—	7	27
7	0.95	1	—	—	—	—	—	—	9	1
8	0.68	10	0.55	20	0.54	10	—	—	24	20
9	1.35	26	—	—	—	—	—	—	10	26
10	—	—	1.28	1	0.93	7	—	—	10	7
11	0.82	2	1.02	1	0.85	12	0.59	4	44	12
12	—	—	0.9	18	—	—	0.58	17	36	18

$$T = 56 \quad C = 321.08$$

Tabela C.22: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net08, na expA.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net08_1_5</i>				
DD	]43.947, 44.287[	]169.669, 171.852[	20336	0.222
DL	]44.161, 44.65[	]169.916, 173.06[	10000	0.059
LD	]45.137, 45.702[	]176.026, 179.275[	10000	0.016
LL	]45.262, 45.829[	]176.062, 179.3[	10000	0.007
<i>MP_Net08_3_315</i>				
DD	]73.954, 74.244[	]466.976, 468.853[	65573	0.537
DL	]75.246, 76.007[	]470.452, 475.339[	10000	0.114
LD	]76.932, 77.705[	]485.461, 490.403[	10000	0.101
LL	]78.175, 78.962[	]490.713, 495.727[	10000	0.009

* intervalo de confiança a 95%; n , tamanho da amostra; Δ_t , tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.23: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net08_1_5, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.07	8	0	8	8	1.13	2	3	2
2	1.09	2	0	2	9	1.4	2	2	2
3	1.37	4	0	4	10	0.82	4	17	4
4	0.84	3	0	3	11	0.59	16	8	16
5	0.82	9	8	9	12	0.83	2	17	2
6	0.88	9	8	9	13	1.42	27	17	27
7	1.16	1	4	1	14	1.27	2	21	2

$$T = 44 \quad C = 170.8$$

Tabela C.24: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net08_3_315, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	s_a	Y_a
1	—	—	0.63	7	—	—	4	7
2	0.67	2	0.51	1	0.74	1	0	2
3	1.43	2	—	—	1.45	5	0	5
4	0.8	1	—	—	1.24	3	0	3
5	—	—	1.11	5	—	—	20	5
6	1.13	1	0.78	9	0.57	7	11	9
7	0.86	1	—	—	0.56	4	3	4
8	—	—	1.01	2	—	—	2	2
9	—	—	0.5	1	—	—	4	1
10	0.93	31	0.56	6	0.61	6	25	31
11	—	—	0.85	23	1.4	1	25	23
12	0.55	5	0.78	9	0.9	4	48	9
13	—	—	1.23	11	1.09	5	63	11
14	0.74	5	0.59	7	1.01	1	56	7

$$T = 74 \quad C = 467.91$$

Tabela C.25: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net09, na expA.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(\text{s})$
<i>MP_Net09_1_3</i>				
DD	]226.553, 228.263[	]803.08, 817.303[	19418	0.852
DL	]228.296, 230.705[	]809.951, 830.002[	10000	0.146
LD	]235.427, 238.242[	]850.391, 871.967[	10000	0.045
LL	]239.152, 241.928[	]872.273, 893.713[	10000	0.014
<i>MP_Net09_3_311</i>				
DD	]399.909, 403.255[	]3056.76, 3089.44[	10411	3.567
DL	]406.288, 409.69[	]3097.21, 3130.17[	10000	0.389
LD	]418.687, 422.315[	]3187.18, 3221.44[	10000	0.166
LL	]426.681, 430.383[	]3243.26, 3278.15[	10000	0.026

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.26: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net09_1_3, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.06	126	0	126	8	0.5	135	76	135
2	1.5	60	2	60	9	0.5	88	62	88
3	1.5	2	0	2	10	1.5	36	166	36
4	0.5	38	126	38	11	0.5	32	166	32
5	1.5	24	126	24	12	1.5	10	150	10
6	0.98	14	62	14	13	1.11	25	202	25
7	1.5	6	160	6	14	1.5	6	211	6

$T = 227 \quad C = 809$

Tabela C.27: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net09_3_311, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	s_a	Y_a
1	0.94	16	0.5	60	1.29	29	57	60
2	1.5	6	—	—	0.91	30	117	30
3	—	—	1.26	56	1.01	57	0	57
4	—	—	0.96	6	—	—	117	6
5	—	—	0.98	7	1.17	10	354	10
6	0.5	31	0.7	37	1.17	5	147	37
7	0.59	7	1.07	3	1.35	3	184	7
8	1.3	15	1.03	5	0.84	11	242	15
9	—	—	0.55	15	—	—	57	15
10	1.35	51	0.72	31	0.89	7	191	51
11	—	—	1.31	21	1.25	6	364	21
12	0.62	163	—	—	0.6	80	191	163
13	0.92	16	1.5	4	1.01	12	385	16
14	—	—	1.5	28	—	—	257	28

$T = 401 \quad C = 3071.66$

Tabela C.28: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net10, na expA.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net10_1_5</i>				
DD	]55.798, 56.006[	]271.389, 273.649[	67693	0.213
DL	]55.547, 56.082[	]268.517, 274.323[	10000	0.057
LD	]58.11, 58.765[	]285.265, 291.629[	10000	0.016
LL	]58.008, 58.657[	]284.897, 291.19[	10000	0.007
<i>MP_Net10_2_33</i>				
DD	]55.898, 56.197[	]306.349, 309.671[	24334	3.551
DL	]56.013, 56.477[	]304.65, 309.82[	10000	0.112
LD	]58.21, 58.761[	]321.073, 326.594[	10000	0.077
LL	]58.994, 59.553[	]327.898, 333.561[	10000	0.011

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.29: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net10_1_5, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	0.8	10	0	10	10	1.48	2	35	2
2	1.48	14	0	14	11	1.14	2	35	2
3	0.75	1	10	1	12	1.22	19	36	19
4	0.6	11	14	11	13	0.73	1	37	1
5	0.89	1	10	1	14	0.83	1	37	1
6	1.08	5	14	5	15	0.88	1	55	1
7	1.44	10	25	10	16	1.13	2	38	2
8	0.84	1	35	1	17	1.34	3	37	3
9	0.81	12	25	12					

T = 56 C = 272.55

Tabela C.30: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net10_2_33, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	0.72	1	0.72	1	0	1	10	1.48	1	0.66	2	32	2
2	0.86	9	0.87	19	0	19	11	—	—	1.36	3	32	3
3	—	—	1.42	1	1	1	12	0.54	1	1.04	1	46	1
4	1.45	9	1.19	10	19	10	13	1.28	1	0.61	5	34	5
5	0.73	5	1.45	4	2	5	14	1.08	2	0.64	5	34	5
6	0.98	6	0.82	7	19	7	15	0.76	3	1.26	1	47	3
7	—	—	1.24	3	29	3	16	0.93	13	—	—	39	13
8	0.75	4	1.02	7	39	7	17	1.31	17	1.03	9	39	17
9	1.34	1	1.14	1	29	1							

T = 56 C = 308.05

Tabela C.31: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net11, na expA.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net11_1_1</i>				
DD	]224.899, 225.902[	]1948.14, 1961.88[	48762	0.763
DL	]226.342, 228.568[	]1963.13, 1993.56[	10000	0.140
LD	]233.623, 235.96[	]2076.56, 2108.41[	10000	0.040
LL	]237.213, 239.601[	]2118.78, 2151.06[	10000	0.013
<i>MP_Net11_4_1155</i>				
DD	]200.014, 201.081[	]2051.94, 2067.31[	19816	6.714
DL	]203.146, 204.679[	]2080.43, 2102.35[	10000	0.301
LD	]210.498, 212.115[	]2161.17, 2183.67[	10000	0.177
LL	]213.767, 215.421[	]2190.47, 2213.31[	10000	0.021

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.32: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net11_1_1, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	0.97	26	0	26	10	0.72	72	44	72
2	0.5	2	0	2	11	0.76	10	178	10
3	1.22	1	43	1	12	1.5	7	118	7
4	0.6	36	44	36	13	1.33	2	188	2
5	0.81	1	26	1	14	0.5	13	133	13
6	0.5	41	2	41	15	0.5	37	146	37
7	0.76	15	80	15	16	1.26	3	190	3
8	0.5	8	125	8	17	0.95	53	125	53
9	0.76	23	95	23	18	1.5	32	193	32

$$T = 225 \quad C = 1954.92$$

Tabela C.33: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net11_4_1155, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	$x_{a,4}$	$Y_{a,4}$	s_a	Y_a
1	1.02	13	0.62	10	0.98	5	0.77	3	0	13
2	1.33	29	—	—	1.5	18	—	—	13	29
3	0.76	9	1.07	2	0.88	1	0.55	5	42	9
4	—	—	—	—	0.99	15	—	—	13	15
5	—	—	—	—	0.64	20	0.72	11	42	20
6	0.65	17	0.5	31	1.35	35	0.5	6	51	35
7	—	—	0.96	22	—	—	—	—	51	22
8	1.45	13	0.79	2	0.58	2	0.61	3	112	13
9	1.25	5	—	—	—	—	1.22	2	86	5
10	—	—	1.25	9	—	—	—	—	86	9
11	—	—	0.56	35	1.43	1	1.44	1	142	35
12	0.76	2	1.04	1	0.5	7	1.2	3	95	7
13	—	—	1.19	7	1.5	12	0.5	3	130	12
14	0.94	2	1.19	1	0.5	5	—	—	125	5
15	1.49	1	1.18	10	—	—	1.05	10	102	10
16	0.75	33	—	—	1.5	9	—	—	168	33
17	0.68	24	0.71	26	—	—	—	—	142	26
18	—	—	0.96	1	1.13	13	—	—	177	13

$$T = 201 \quad C = 2060.25$$

Tabela C.34: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net12, na expA.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net12_1_5</i>				
DD	]259.189, 260.238[	]1812.11, 1828.56[	47934	0.702
DL	]259.528, 261.857[	]1808.89, 1845.31[	10000	0.154
LD	]273.158, 275.908[	]1958.01, 1998.29[	10000	0.041
LL	]275.837, 278.645[	]1992.33, 2033.49[	10000	0.013
<i>MP_Net12_2_13</i>				
DD	]530.702, 533.468[	]5955.85, 5998.64[	19798	8.107
DL	]536.73, 540.596[	]6028.28, 6088.09[	10000	0.383
LD	]559.268, 563.5[	]6309.67, 6373.7[	10000	0.250
LL	]565.411, 569.576[	]6382.53, 6445.4[	10000	0.027

* intervalo de confiança a 95%; n : tamanho da amostra; Δ_t : tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.35: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net12_1_5, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	0.56	12	0	12	13	0.74	87	70	87
2	0.95	31	0	31	14	1.31	1	69	1
3	1.47	16	53	16	15	1.49	1	119	1
4	1.48	119	0	119	16	1.21	9	134	9
5	0.99	7	12	7	17	1.03	12	57	12
6	1.48	7	12	7	18	1.13	48	157	48
7	0.59	32	31	32	19	1.04	63	120	63
8	1.2	13	38	13	20	1.0	4	53	4
9	0.56	19	19	19	21	0.86	99	63	99
10	1.06	28	106	28	22	1.2	55	205	55
11	1.49	34	19	34	23	0.58	27	100	27
12	1.21	37	69	37	24	0.68	30	70	30

$$T = 260 \quad C = 1820.55$$

Tabela C.36: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net12_2_13, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	1.46	7	0.96	10	0	10	13	1.4	18	0.5	47	324	47
2	0.5	31	0.8	151	46	151	14	1.5	2	1.22	3	284	3
3	0.54	38	0.86	31	196	38	15	1.02	6	0.83	21	287	21
4	1.2	36	1.17	29	10	36	16	—	—	0.9	22	217	22
5	0.96	126	—	—	46	126	17	1.5	13	1.39	3	371	13
6	—	—	1.22	85	10	85	18	1.5	3	—	—	384	3
7	0.93	11	0.72	47	197	47	19	—	—	1.14	25	308	25
8	—	—	1.02	59	95	59	20	0.7	1	1.43	14	417	14
9	0.5	24	1.5	7	172	24	21	0.5	40	1.28	38	244	40
10	—	—	1.26	21	196	21	22	1.04	11	1.5	15	402	15
11	0.5	8	0.51	39	234	39	23	0.66	116	0.91	18	417	116
12	1.08	16	—	—	308	16	24	1.5	4	0.5	15	387	15

$$T = 533 \quad C = 5976.75$$

Tabela C.37: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net13, na expA.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net13_1_1</i>				
DD	]544.116, 547.658[	]3429.99, 3456.65[	12432	11.665
DL	]555.885, 559.768[	]3500.22, 3529.4[	10620	0.294
LD	]558.513, 562.494[	]3584.47, 3614.86[	10000	0.101
LL	]569.793, 573.819[	]3655.49, 3686.14[	10000	0.024
<i>MP_Net13_2_31</i>				
DD	]524.151, 526.079[	]4079.26, 4095.71[	24181	11.676
DL	]534.812, 537.883[	]4139.55, 4165.62[	10000	0.433
LD	]539.339, 542.463[	]4180.43, 4206.52[	10000	0.225
LL	]552.016, 555.216[	]4255.76, 4282.51[	10000	0.033

* intervalo de confiança a 95%; n : tamanho da amostra; Δ_t : tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.38: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net13_1_1, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.5	3	0	3	20	0.5	113	260	113
2	1.5	18	3	18	21	0.5	19	128	19
3	0.5	8	38	8	22	1.5	8	156	8
4	1.5	11	93	11	23	0.5	50	260	50
5	1.5	5	33	5	24	1.5	3	72	3
6	0.5	64	164	64	25	0.5	48	454	48
7	0.5	33	38	33	26	0.5	89	445	89
8	0.5	34	38	34	27	0.5	24	421	24
9	1.5	3	228	3	28	1.5	10	83	10
10	1.5	12	21	12	29	1.5	8	538	8
11	1.5	12	247	12	30	0.5	33	421	33
12	1.5	24	104	24	31	0.5	73	465	73
13	0.5	33	164	33	32	1.5	3	394	3
14	0.5	8	75	8	33	1.5	24	397	24
15	0.5	115	260	115	34	1.5	2	147	2
16	1.5	12	231	12	35	1.5	5	389	5
17	0.5	4	243	4	36	1.5	10	375	10
18	1.5	7	149	7	37	1.5	4	385	4
19	1.5	1	259	1	38	0.5	44	421	44

$$T = 546 \quad C = 3444.08$$

Tabela C.39: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net13_2_31, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	1.5	7	0.85	52	84	52	20	1.32	1	1.41	3	276	3
2	1.23	6	1.5	18	0	18	21	1.36	10	0.83	26	309	26
3	0.91	7	0.78	38	136	38	22	0.58	18	1.5	7	433	18
4	1.23	2	0.7	50	136	50	23	0.93	12	—	—	433	12
5	0.95	12	1.33	10	186	12	24	0.7	4	1.5	2	80	4
6	0.5	18	1.42	6	219	18	25	0.71	2	1.19	3	451	3
7	1.34	2	1.19	5	198	5	26	1.5	11	1.03	25	492	25
8	—	—	0.54	23	18	23	27	1.5	16	1.03	1	454	16
9	0.84	6	0.91	8	211	8	28	1.22	1	0.5	4	211	4
10	0.5	41	0.68	62	18	62	29	1.07	9	1.5	1	517	9
11	1.23	3	1.5	10	266	10	30	0.79	1	1.5	2	470	2
12	1.5	4	0.5	5	259	5	31	1.5	29	—	—	492	29
13	1.3	1	1.5	8	203	8	32	0.68	35	0.72	6	374	35
14	1.27	18	0.5	12	279	18	33	1.43	6	—	—	297	6
15	1.5	10	0.5	22	237	22	34	—	—	0.63	24	84	24
16	0.5	6	0.5	27	239	27	35	—	—	0.5	24	350	24
17	1.29	1	0.5	2	237	2	36	1.12	15	0.9	8	335	15
18	—	—	0.5	146	287	146	37	1.49	12	0.83	6	297	12
19	1.5	7	0.59	8	279	8	38	1.32	20	1.33	1	472	20

T = 526 C = 4087.44

Tabela C.40: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net14, na expA.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net14_1_5</i>				
DD	]221.432, 222.624[	]901.795, 911.703[	51879	3.030
DL	]220.971, 223.673[	]898.154, 920.567[	10000	0.137
LD	]224.789, 227.827[	]931.323, 954.774[	10000	0.046
LL	]224.092, 227.081[	]924.241, 947.327[	10000	0.014
<i>MP_Net14_2_31</i>				
DD	]336.158, 338.185[	]1991.43, 2010.53[	17646	9.264
DL	]339.547, 342.246[	]2013.7, 2039.22[	10000	0.352
LD	]348.339, 351.259[	]2061.17, 2087.58[	10000	0.320
LL	]350.601, 353.488[	]2069.43, 2095.83[	10000	0.029

* intervalo de confiança a 95%; n : tamanho da amostra; Δ_t : tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.41: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net14_1_5, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.25	106	0	106	26	1.44	1	180	1
2	1.19	3	106	3	27	1.42	22	158	22
3	1.2	3	109	3	28	1.29	10	148	10
4	1.32	10	106	10	29	0.88	5	199	5
5	0.53	27	109	27	30	1.26	1	198	1
6	0.72	10	117	10	31	0.98	10	188	10
7	0.69	9	120	9	32	1.32	4	145	4
8	1.29	4	116	4	33	0.59	1	128	1
9	0.53	3	112	3	34	0.96	5	143	5
10	1.41	7	116	7	35	0.69	6	143	6
11	1.34	1	116	1	36	1.38	1	136	1
12	0.71	1	117	1	37	1.06	1	141	1
13	1.33	11	129	11	38	0.99	3	124	3
14	1.21	2	136	2	39	0.53	3	129	3
15	0.86	2	118	2	40	1.08	18	137	18
16	1.32	3	124	3	41	1.19	7	209	7
17	1.47	2	127	2	42	0.62	5	204	5
18	1.08	3	140	3	43	0.85	11	154	11
19	0.84	4	137	4	44	1.12	5	149	5
20	1.06	5	138	5	45	0.6	1	171	1
21	0.8	9	127	9	46	1.03	6	165	6
22	0.73	8	120	8	47	1.29	3	132	3
23	0.54	18	127	18	48	0.85	1	155	1
24	1.45	1	123	1	49	1.49	6	216	6
25	1.16	7	181	7					

$$T = 222 \quad C = 907.26$$

Tabela C.42: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net14_2_31, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	1.02	100	1.11	51	0	100	26	1.2	5	1.29	1	291	5
2	—	—	1.46	10	119	10	27	0.51	1	1.24	3	288	3
3	—	—	0.85	1	134	1	28	0.67	6	0.53	33	255	33
4	0.81	2	0.73	5	100	5	29	—	—	1.42	1	314	1
5	1.15	25	0.58	7	182	25	30	1.14	1	1.22	3	311	3
6	0.82	4	1.21	1	135	4	31	0.84	1	0.68	12	299	12
7	0.61	5	0.96	6	174	6	32	1.21	2	—	—	146	2
8	1.16	1	1.35	2	129	2	33	1.3	6	0.77	6	182	6
9	—	—	0.85	3	164	3	34	1.24	11	0.99	4	241	11
10	1.1	4	1.36	7	157	7	35	0.77	5	0.66	8	252	8
11	—	—	1.41	14	105	14	36	1.39	1	1.12	1	156	1
12	0.93	2	0.85	3	131	3	37	0.56	3	1.14	1	230	3
13	0.71	2	1.19	1	180	2	38	0.9	5	1.49	1	216	5
14	1.2	1	—	—	207	1	39	0.74	5	0.55	3	190	5
15	0.96	3	—	—	134	3	40	1.1	3	1.38	3	233	3
16	0.77	5	—	—	131	5	41	1.29	11	1.32	15	318	15
17	1.05	5	0.68	7	167	7	42	1.04	3	—	—	315	3
18	0.67	2	0.77	2	188	2	43	1.02	1	0.72	2	260	2
19	0.89	2	1.35	1	228	2	44	1.5	1	—	—	233	1
20	1.46	3	1.12	5	236	5	45	0.95	6	—	—	316	6
21	0.64	17	1.03	12	139	17	46	1.35	1	1.46	1	315	1
22	0.94	1	0.58	10	164	10	47	1.42	1	1.06	7	221	7
23	0.63	10	—	—	136	10	48	1.33	2	0.68	3	252	3
24	1.09	9	1.4	4	207	9	49	0.81	4	0.76	3	333	4
25	1.27	3	0.97	3	296	3							

$$T = 337 \quad C = 2001.72$$

C.2 Listagem para a expB

Tabela C.43: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net01, na expB.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	Δ_t (s)
<i>MP_Net01_1_NAC</i>				
DD	]24.107, 24.972[	]65.223, 69.039[	3398	0.361
DL	]24.173, 25.598[	]65.183, 71.44[	1400	0.099
LD	]23.219, 24.549[	]68.992, 74.813[	1600	0.022
LL	]23.475, 24.716[	]69.009, 74.345[	1926	0.010
<i>MP_Net01_2_NAC</i>				
DD	]21.086, 21.67[	]78.478, 81.611[	3400	0.465
DL	]21.239, 22.212[	]78.653, 83.986[	1400	0.114
LD	]21.01, 21.967[	]82.253, 87.25[	1400	0.026
LL	]20.806, 21.654[	]82.52, 86.996[	1800	0.010

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.44: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_1_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.03	1	0	1
2	0.94	5	1	5
3	0.91	25	0	25

T = 25 C = 67.03

Tabela C.45: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net01_2_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	0.64	11	0.72	4	0	11
2	1.1	1	1.07	10	11	10
3	0.79	19	1.38	2	0	19

T = 21 C = 79.7

Tabela C.46: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net02, na expB.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net02_1_NAC</i>				
DD	]114.988, 118.062[	]281.735, 308.301[	2400	0.608
DL	]114.692, 118.947[	]287.766, 324.592[	1400	0.157
LD	]120.106, 125.581[	]334.635, 378.065[	1400	0.032
LL	]120.723, 125.913[	]341.658, 382.627[	1600	0.013
<i>MP_Net02_4_NAC</i>				
DD	]117.706, 121.383[	]886.898, 936.858[	1402	0.972
DL	]118.4, 122.297[	]896.795, 949.616[	1400	0.256
LD	]122.672, 127.49[	]950.692, 1006.73[	1400	0.056
LL	]123.106, 127.834[	]949.774, 1006.22[	1400	0.020

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.47: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_1_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.12	57	0	57
2	1.1	107	0	107
3	1.23	41	57	41
4	0.52	52	57	52
5	1.45	10	107	10

$T = 117 \quad C = 294.35$

Tabela C.48: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net02_4_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	$x_{a,4}$	$Y_{a,4}$	s_a	Y_a
1	1.08	36	—	—	—	—	—	—	0	36
2	1.28	38	0.9	24	0.67	31	0.9	7	0	38
3	1.09	7	0.78	17	1.36	5	—	—	36	17
4	0.81	38	—	—	0.97	8	1.37	42	36	42
5	0.94	69	0.52	29	—	—	—	—	53	69

$T = 122 \quad C = 911.65$

Tabela C.49: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net03, na expB.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net03_1_NAC</i>				
DD	]76.456, 78.323[	]287.682, 304.016[	2599	0.567
DL	]76.367, 78.926[	]285.924, 308.476[	1400	0.145
LD	]79.768, 82.912[	]296.359, 319.954[	1400	0.031
LL	]79.978, 82.962[	]298.345, 320.936[	1600	0.013
<i>MP_Net03_2_NAC</i>				
DD	]75.792, 77.523[	]454.334, 472.395[	2400	0.689
DL	]75.206, 77.472[	]445.808, 468.685[	1400	0.184
LD	]78.164, 80.804[	]470.922, 495.028[	1400	0.041
LL	]79.93, 82.539[	]485.644, 509.68[	1600	0.016

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.50: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net03_1_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.32	4	0	4	5	0.56	37	30	37
2	0.69	30	0	30	6	0.89	37	30	37
3	0.71	12	4	12	7	1.12	2	74	2
4	1.17	70	4	70					

$T = 76 \quad C = 295.73$

Tabela C.51: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net03_2_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	0.94	5	1.26	13	0	13	5	1.13	26	1.33	3	21	26
2	1.21	6	1.13	8	0	8	6	1.14	6	0.85	40	21	40
3	0.6	7	0.59	8	13	8	7	0.76	31	—	—	47	31
4	0.5	14	0.83	30	13	30							

$T = 78 \quad C = 461.51$

Tabela C.52: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net04, na expB.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net04_1_NAC</i>				
DD	]140.039, 143.93[	]797.618, 833.436[	3394	0.780
DL	]137.296, 143.675[	]778.841, 836.856[	1400	0.194
LD	]140.741, 147.371[	]811.231, 867.94[	1400	0.040
LL	]143.694, 150.089[	]837.382, 893.465[	1620	0.018
<i>MP_Net04_2_NAC</i>				
DD	]126.877, 130.727[	]691.034, 720.064[	2400	0.917
DL	]126.417, 131.348[	]680.087, 717.929[	1400	0.243
LD	]130.756, 136.118[	]720.295, 759.386[	1400	0.054
LL	]131.017, 136.83[	]718.802, 760.545[	1400	0.021

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.53: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net04_1_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	0.67	4	0	4	6	0.67	47	37	47
2	1.01	140	0	140	7	0.56	64	37	64
3	1.13	2	0	2	8	1.37	27	101	27
4	0.52	38	4	38	9	1.05	3	84	3
5	0.74	33	4	33					

$$T = 140 \quad C = 809.57$$

Tabela C.54: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net04_2_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	0.84	72	1.13	47	0	72	6	1.21	21	0.91	20	93	21
2	—	—	1.03	17	0	17	7	0.74	2	0.79	10	93	10
3	1.19	22	1.29	10	0	22	8	1.03	5	1.47	1	103	5
4	0.81	41	—	—	72	41	9	0.81	9	0.88	12	114	12
5	1.19	2	1.13	21	72	21							

$$T = 126 \quad C = 707.89$$

Tabela C.55: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net05, na expB.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net05_1_NAC</i>				
DD	]34.638, 35.483[	]247.052, 259.11[	2600	0.662
DL	]34.307, 35.441[	]241.301, 257.302[	1400	0.159
LD	]36.498, 37.833[	]258.623, 275.534[	1400	0.034
LL	]35.995, 37.307[	]251.181, 267.751[	1468	0.015
<i>MP_Net05_3_NAC</i>				
DD	]33.329, 34.064[	]291.481, 301.797[	2400	0.736
DL	]33.11, 34.039[	]287.371, 300.435[	1400	0.210
LD	]34.879, 36.023[	]300.465, 314.94[	1400	0.048
LL	]35.127, 36.247[	]304.385, 318.958[	1400	0.022

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.56: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net05_1_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.43	8	0	8	7	0.95	1	11	1
2	1.5	1	0	1	8	0.59	12	11	12
3	0.5	2	0	2	9	0.5	5	12	5
4	0.89	3	8	3	10	1.48	3	32	3
5	1.25	1	11	1	11	1.39	1	12	1
6	1.43	24	8	24					

$$T = 35 \quad C = 252.86$$

Tabela C.57: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net05_3_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	s_a	Y_a
1	0.73	7	1.23	16	—	—	0	16
2	1.38	4	0.73	16	0.94	4	0	16
3	0.72	4	0.97	1	1.06	3	0	4
4	0.94	1	1.35	3	1.25	4	16	4
5	1.37	1	1.31	1	0.74	2	20	2
6	—	—	1.14	13	—	—	16	13
7	0.75	3	1.25	1	1.32	1	20	3
8	—	—	0.92	11	—	—	20	11
9	0.85	1	1.26	2	0.94	2	22	2
10	1.12	1	—	—	1.11	5	29	5
11	—	—	0.6	1	0.92	2	22	2

$T = 34 \quad C = 296.09$

Tabela C.58: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net06, na expB.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net06_1_NAC</i>				
DD	]84.119, 86.146[	]504.173, 524.578[	3399	0.768
DL	]83.115, 86.094[	]496.738, 526.457[	1400	0.193
LD	]85.653, 89.116[	]506.224, 538.651[	1400	0.041
LL	]86.388, 89.585[	]519.16, 549.304[	1600	0.016
<i>MP_Net06_3_NAC</i>				
DD	]82.424, 84.564[	]686.876, 710.87[	2400	0.922
DL	]81.887, 84.696[	]682.436, 714.248[	1400	0.261
LD	]84.058, 87.19[	]692.805, 725.357[	1400	0.055
LL	]85.243, 88.347[	]705.672, 738.074[	1402	0.028

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.59: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net06_1_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.0	8	0	8	7	1.17	46	33	46
2	1.22	5	0	5	8	0.87	5	17	5
3	1.1	17	0	17	9	1.42	7	17	7
4	1.48	25	8	25	10	1.23	5	24	5
5	1.31	10	8	10	11	1.25	5	79	5
6	0.52	50	8	50					

T = 84 C = 515.93

Tabela C.60: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net06_3_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	s_a	Y_a
1	1.11	2	—	—	1.27	1	0	2
2	0.99	3	1.44	1	—	—	0	3
3	1.31	9	—	—	0.98	7	0	9
4	—	—	1.19	52	—	—	2	52
5	0.9	8	0.54	1	0.56	5	2	8
6	—	—	0.99	9	—	—	2	9
7	0.78	26	—	—	—	—	54	26
8	0.51	60	0.67	67	—	—	9	67
9	0.6	29	0.74	22	1.07	43	9	43
10	0.95	8	1.35	2	1.3	1	52	8
11	—	—	1.2	4	—	—	80	4

T = 84 C = 697.13

Tabela C.61: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net07, na expB.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	Δ_t (s)
<i>MP_Net07_1_NAC</i>				
DD	]56.8, 58.393[	]242.837, 254.989[	1400	0.515
DL	]56.623, 58.215[	]242.811, 255.122[	1400	0.181
LD	]60.026, 61.937[	]259.467, 272.582[	1400	0.040
LL	]58.327, 59.989[	]252.148, 263.715[	1600	0.015
<i>MP_Net07_4_NAC</i>				
DD	]53.909, 54.815[	]311.042, 318.738[	2400	0.952
DL	]54.562, 55.816[	]315.978, 325.962[	1400	0.271
LD	]56.818, 58.302[	]322.97, 333.904[	1400	0.057
LL	]57.038, 58.495[	]327.178, 337.852[	1400	0.022

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.62: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net07_1_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	0.5	3	0	3	7	1.03	9	5	9
2	0.58	5	0	5	8	1.28	5	39	5
3	0.61	4	0	4	9	0.88	4	5	4
4	1.22	23	0	23	10	1.31	8	23	8
5	1.07	36	3	36	11	0.56	1	44	1
6	0.57	18	3	18	12	0.9	27	31	27

$T = 58 \quad C = 249.19$

Tabela C.63: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net07_4_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	$x_{a,4}$	$Y_{a,4}$	s_a	Y_a
1	1.05	7	0.85	2	1.19	3	1.28	10	0	10
2	1.27	28	—	—	—	—	—	—	0	28
3	0.75	18	—	—	—	—	0.89	2	0	18
4	—	—	—	—	—	—	0.55	11	0	11
5	1.09	1	1.2	2	1.24	6	0.7	17	10	17
6	—	—	0.9	12	0.51	12	—	—	10	12
7	0.91	5	—	—	—	—	—	—	28	5
8	1.18	8	0.98	4	0.59	6	—	—	27	8
9	0.58	9	—	—	—	—	—	—	28	9
10	—	—	0.94	1	1.3	6	—	—	33	6
11	0.85	2	0.97	3	1.3	1	1.4	7	35	7
12	—	—	0.79	10	—	—	1.35	15	39	15

$$T = 54 \quad C = 314.59$$

Tabela C.64: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net08, na expB.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net08_1_NAC</i>				
DD	]43.719, 44.951[	]168.359, 176.206[	1600	0.592
DL	]43.505, 44.832[	]165.345, 173.747[	1400	0.195
LD	]44.362, 45.713[	]173.051, 180.926[	1600	0.040
LL	]44.421, 45.728[	]172.796, 180.478[	1600	0.016
<i>MP_Net08_3_NAC</i>				
DD	]43.602, 44.531[	]378.476, 386.647[	2400	0.782
DL	]43.561, 44.735[	]380.607, 390.949[	1400	0.257
LD	]44.591, 45.979[	]390.806, 402.01[	1400	0.055
LL	]44.728, 46.066[	]388.246, 399.124[	1400	0.020

* intervalo de confiança a 95%; n , tamanho da amostra; Δ_t , tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.65: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net08_1_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	0.58	6	0	6	8	0.52	16	2	16
2	1.33	2	0	2	9	1.45	4	2	4
3	0.84	17	0	17	10	1.45	18	25	18
4	0.63	13	0	13	11	0.51	5	6	5
5	0.96	19	6	19	12	0.69	10	19	10
6	0.61	13	6	13	13	1.32	1	25	1
7	0.85	3	2	3	14	1.49	1	43	1

$$T = 44 \quad C = 171.96$$

Tabela C.66: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net08_3_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	s_a	Y_a
1	—	—	0.66	17	—	—	0	17
2	0.55	2	0.99	4	0.92	1	0	4
3	1.24	4	—	—	0.67	3	0	4
4	0.61	1	—	—	1.24	9	0	9
5	—	—	0.64	8	—	—	17	8
6	0.77	7	1.27	4	1.18	1	17	7
7	0.86	5	—	—	0.91	1	4	5
8	—	—	0.52	2	—	—	4	2
9	—	—	0.82	9	—	—	4	9
10	1.19	6	0.97	1	0.68	7	25	7
11	—	—	1.18	27	0.51	13	17	27
12	0.81	1	1.25	3	1.48	1	24	3
13	—	—	1.19	2	0.55	10	25	10
14	1.31	1	1.08	11	0.57	9	32	11

$$T = 44 \quad C = 382.41$$

Tabela C.67: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net09, na expB.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net09_1_NAC</i>				
DD	]206.292, 212.571[	]692.26, 743.086[	1400	0.895
DL	]206.033, 212.41[	]691.302, 742.195[	1400	0.273
LD	]218.75, 226.197[	]771.127, 825.877[	1400	0.060
LL	]216.143, 223.699[	]756.866, 811.835[	1400	0.023
<i>MP_Net09_3_NAC</i>				
DD	]207.274, 210.665[	]1910.32, 1952.83[	2781	1.977
DL	]206.275, 210.986[	]1897.13, 1957.78[	1400	0.532
LD	]216.418, 222.129[	]1969.47, 2031.83[	1400	0.113
LL	]211.709, 217.198[	]1950.62, 2013.72[	1400	0.037

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.68: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net09_1_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.5	57	0	57	8	0.83	29	1	29
2	1.09	10	0	10	9	0.71	54	1	54
3	1.5	1	0	1	10	1.44	25	176	25
4	1.45	119	57	119	11	0.85	1	67	1
5	1.04	10	57	10	12	1.11	32	55	32
6	0.5	135	10	135	13	0.5	8	201	8
7	0.5	44	10	44	14	1.5	3	30	3

$$T = 209 \quad C = 713$$

Tabela C.69: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net09_3_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	s_a	Y_a
1	1.27	2	1.35	3	0.83	11	0	11
2	1.08	32	–	–	1.09	10	0	32
3	–	–	0.52	9	0.98	13	0	13
4	–	–	0.88	42	–	–	11	42
5	–	–	0.81	21	1.43	17	11	21
6	0.55	25	1.02	22	0.81	10	32	25
7	1.15	23	1.42	2	0.73	1	32	23
8	0.71	39	1.39	1	1.32	11	13	39
9	–	–	0.6	33	–	–	13	33
10	0.94	125	1.41	32	1.07	40	57	125
11	–	–	1.08	60	0.58	6	55	60
12	0.51	22	–	–	0.99	28	46	28
13	1.38	19	1.06	2	1.06	28	182	28
14	–	–	0.72	71	–	–	52	71

$T = 210 \quad C = 1934.05$

Tabela C.70: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net10, na expB.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net10_1_NAC</i>				
DD	]55.373, 56.857[	]266.585, 282.67[	1400	0.543
DL	]55.297, 56.746[	]265.62, 281.454[	1400	0.183
LD	]57.754, 59.478[	]282.612, 299.234[	1400	0.045
LL	]57.972, 59.691[	]284.975, 301.788[	1400	0.017
<i>MP_Net10_2_NAC</i>				
DD	]53.877, 54.837[	]293.531, 304.06[	2400	0.755
DL	]53.49, 54.765[	]291.489, 305.353[	1400	0.247
LD	]55.483, 56.927[	]300.796, 314.829[	1400	0.056
LL	]55.891, 57.369[	]305.169, 319.542[	1405	0.022

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.71: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net10_1_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.1	2	0	2	10	1.07	3	35	3
2	0.91	12	0	12	11	0.58	17	35	17
3	0.77	10	2	10	12	1.14	7	44	7
4	1.01	5	12	5	13	1.16	3	38	3
5	1.0	6	2	6	14	0.95	6	38	6
6	0.76	23	12	23	15	1.19	4	51	4
7	0.98	15	17	15	16	1.45	5	52	5
8	1.34	9	35	9	17	0.57	2	38	2
9	0.78	1	17	1					

T = 57 C = 274.21

Tabela C.72: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net10_2_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	1.18	7	0.56	1	0	7	10	1.32	3	1.13	1	45	3
2	0.82	4	0.51	10	0	10	11	—	—	0.92	1	45	1
3	—	—	1.13	11	7	11	12	1.1	2	0.61	2	47	2
4	1.05	1	0.62	11	10	11	13	1.35	1	1.26	1	48	1
5	0.68	3	0.66	5	7	5	14	0.75	3	0.96	4	48	4
6	0.69	3	0.95	1	10	3	15	1.41	3	0.9	2	52	3
7	—	—	1.35	24	21	24	16	0.66	4	—	—	49	4
8	0.72	1	1.1	2	45	2	17	1.19	3	1.22	7	48	7
9	0.95	1	0.63	4	21	4							

T = 55 C = 298.77

Tabela C.73: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net11, na expB.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net11_1_NAC</i>				
DD	]122.077, 125.18[	]1000.1, 1052.66[	1400	0.713
DL	]121.248, 124.46[	]987.648, 1040.83[	1400	0.237
LD	]126.485, 130.152[	]1046.95, 1100.93[	1400	0.056
LL	]125.881, 129.642[	]1043.84, 1099.82[	1400	0.022
<i>MP_Net11_4_NAC</i>				
DD	]117.34, 119.148[	]1253.99, 1282.35[	2600	1.492
DL	]115.933, 118.527[	]1238.92, 1279.06[	1200	0.622
LD	]122.113, 125.168[	]1306.86, 1351.[	1400	0.097
LL	]121.772, 124.764[	]1294.28, 1337.29[	1400	0.032

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.74: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net11_1_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.34	14	0	14	10	0.53	2	90	2
2	1.23	24	0	24	11	0.51	51	14	51
3	1.27	6	0	6	12	0.71	14	10	14
4	1.24	18	14	18	13	0.65	17	92	17
5	0.73	16	24	16	14	1.32	22	63	22
6	0.62	66	24	66	15	0.66	6	24	6
7	1.09	8	6	8	16	1.06	14	109	14
8	1.49	23	40	23	17	1.23	14	24	14
9	1.14	4	6	4	18	0.86	4	65	4

$$T = 123 \quad C = 1023.23$$

Tabela C.75: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net11_4_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	$x_{a,3}$	$Y_{a,3}$	$x_{a,4}$	$Y_{a,4}$	s_a	Y_a
1	0.86	3	1.47	19	0.57	18	1.43	5	0	19
2	0.74	20	—	—	0.83	5	—	—	0	20
3	0.66	1	0.92	3	1.42	2	0.61	7	0	7
4	—	—	—	—	1.1	9	—	—	19	9
5	—	—	—	—	0.76	6	1.44	13	20	13
6	1.44	5	0.97	32	1.34	3	0.88	3	20	32
7	—	—	1.15	1	—	—	—	—	7	1
8	1.42	12	1.12	2	1.41	4	1.12	3	33	12
9	0.86	1	—	—	—	—	0.93	3	7	3
10	—	—	0.65	12	—	—	—	—	52	12
11	—	—	0.95	2	1.01	5	1.25	1	8	5
12	1.17	1	1.11	2	0.91	18	1.11	7	10	18
13	—	—	1.16	7	1.46	12	1.46	17	67	17
14	0.7	8	1.44	1	1.4	22	—	—	45	22
15	0.57	11	1.1	1	—	—	1.49	1	28	11
16	0.83	34	—	—	0.79	10	—	—	84	34
17	0.78	38	1.5	2	—	—	—	—	28	38
18	—	—	0.51	2	0.51	37	—	—	39	37

$$T = 118 \quad C = 1267.81$$

Tabela C.76: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net12, na expB.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net12_1_NAC</i>				
DD	]248.553, 254.901[	]1695.9, 1792.21[	1400	1.382
DL	]249.71, 255.945[	]1715.99, 1811.28[	1400	0.432
LD	]263.974, 271.284[	]1867.46, 1971.26[	1400	0.100
LL	]267.1, 274.804[	]1906.22, 2015.77[	1400	0.034
<i>MP_Net12_2_NAC</i>				
DD	]241.017, 244.848[	]2558.72, 2626.07[	2400	2.262
DL	]242.075, 247.412[	]2583.98, 2680.59[	1200	0.920
LD	]254.741, 260.477[	]2713.5, 2808.34[	1400	0.141
LL	]255.835, 261.428[	]2743.24, 2833.63[	1600	0.048

* intervalo de confiança a 95%; n : tamanho da amostra; Δ_t : tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.77: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net12_1_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.26	83	0	83	13	1.23	30	148	30
2	1.32	1	0	1	14	1.05	77	98	77
3	1.27	98	0	98	15	1.22	34	54	34
4	0.77	54	0	54	16	1.03	31	135	31
5	1.19	7	83	7	17	1.17	20	148	20
6	0.74	47	83	47	18	0.88	11	178	11
7	0.84	35	1	35	19	1.25	24	88	24
8	0.76	18	130	18	20	1.06	4	191	4
9	0.87	3	90	3	21	1.48	23	93	23
10	0.74	5	130	5	22	0.88	2	189	2
11	0.81	61	130	61	23	1.29	17	235	17
12	0.84	38	98	38	24	1.31	60	175	60

$$T = 252 \quad C = 1741.01$$

Tabela C.78: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net12_2_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	0.97	29	1.32	29	0	29	13	1.28	27	1.0	6	69	27
2	1.17	43	1.01	82	0	82	14	1.02	4	0.97	4	16	4
3	0.89	1	1.13	16	0	16	15	0.97	72	0.65	49	64	72
4	0.68	32	0.91	64	0	64	16	—	—	1.22	7	81	7
5	0.98	6	—	—	29	6	17	1.12	29	0.56	18	69	29
6	—	—	0.71	35	29	35	18	0.66	3	—	—	96	3
7	1.06	50	0.57	106	82	106	19	—	—	1.31	60	136	60
8	—	—	0.87	5	64	5	20	0.92	18	1.14	26	117	26
9	0.72	5	0.6	15	35	15	21	1.28	5	0.99	50	188	50
10	—	—	1.05	17	64	17	22	1.29	1	1.1	2	196	2
11	1.05	9	1.29	53	64	53	23	0.95	76	1.21	53	124	76
12	1.39	5	—	—	16	5	24	1.19	26	0.57	1	98	26

$$T = 238 \quad C = 2591.28$$

Tabela C.79: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net13, na expB.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net13_1_NAC</i>				
DD	]210.258, 215.315[	]1877.97, 1929.74[	1400	1.415
DL	]210.628, 215.468[	]1891.37, 1943.81[	1400	0.500
LD	]213.945, 219.237[	]1896.82, 1948.6[	1400	0.106
LL	]215.489, 220.941[	]1910.02, 1963.71[	1400	0.037
<i>MP_Net13_2_NAC</i>				
DD	]197.47, 200.063[	]2439.36, 2471.55[	3012	2.080
DL	]195.884, 199.85[	]2423.7, 2472.58[	1200	1.106
LD	]204.144, 208.376[	]2488.36, 2536.15[	1400	0.155
LL	]205.617, 209.834[	]2499.01, 2547.68[	1400	0.048

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.80: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net13_1_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	1.26	8	0	8	20	0.61	66	83	66
2	1.0	2	0	2	21	0.88	23	50	23
3	1.38	9	8	9	22	0.9	50	50	50
4	0.63	42	8	42	23	1.15	52	115	52
5	0.72	18	8	18	24	0.62	69	46	69
6	0.96	16	26	16	25	1.49	13	152	13
7	1.16	4	26	4	26	0.57	2	195	2
8	0.98	9	2	9	27	1.13	11	182	11
9	1.3	3	26	3	28	0.68	2	26	2
10	1.43	44	2	44	29	1.08	14	197	14
11	0.99	41	42	41	30	1.46	10	195	10
12	1.13	10	30	10	31	0.96	27	176	27
13	0.67	8	30	8	32	1.25	13	182	13
14	0.64	33	30	33	33	1.29	3	149	3
15	0.54	89	29	89	34	0.77	2	46	2
16	1.11	8	29	8	35	1.12	5	92	5
17	0.6	2	29	2	36	1.13	33	149	33
18	1.24	3	50	3	37	1.41	1	149	1
19	0.65	9	83	9	38	0.78	9	167	9

$$T = 211 \quad C = 1906.53$$

Tabela C.81: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net13_2_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	1.0	13	1.05	2	0	13	20	0.69	2	0.98	25	129	25
2	0.63	54	0.56	12	0	54	21	0.51	14	1.44	9	48	14
3	1.48	16	1.03	1	13	16	22	0.8	11	1.33	1	48	11
4	0.52	35	0.68	2	13	35	23	1.42	14	—	—	148	14
5	1.14	4	0.79	2	13	4	24	1.46	17	0.59	31	105	31
6	0.86	3	0.84	50	17	50	25	1.01	25	0.74	24	158	25
7	0.77	3	0.58	16	17	16	26	1.1	9	1.31	11	167	11
8	—	—	0.53	19	54	19	27	1.14	29	1.23	14	161	29
9	0.78	1	1.4	10	17	10	28	0.61	9	0.72	4	17	9
10	0.8	51	1.39	1	54	51	29	0.76	7	1.21	3	190	7
11	1.03	11	0.84	62	67	62	30	1.22	6	1.4	3	167	6
12	0.76	1	0.9	15	33	15	31	1.32	7	—	—	191	7
13	1.16	4	0.95	8	33	8	32	0.55	6	1.37	2	161	6
14	0.59	52	0.78	6	33	52	33	1.36	4	—	—	154	4
15	0.68	69	1.11	4	73	69	34	—	—	0.96	11	105	11
16	0.98	4	0.91	75	73	75	35	—	—	0.72	7	147	7
17	1.02	1	1.26	1	73	1	36	0.72	7	1.21	1	154	7
18	—	—	0.71	21	48	21	37	1.22	3	1.38	1	154	3
19	0.88	9	1.22	18	129	18	38	0.56	29	1.1	5	162	29

$$T = 198 \quad C = 2457.56$$

Tabela C.82: Quadro comparativo de resultados médios obtidos para o grupo de projectos MP_Net14, na expB.

Conf.	\bar{T}^*	\bar{C}^*	n	$\Delta_t(s)$
<i>MP_Net14_1_NAC</i>				
DD	]214.233, 220.953[	]854.279, 909.144[	1400	1.286
DL	]213.468, 220.581[	]856.312, 913.528[	1400	0.478
LD	]216.123, 222.712[	]860.838, 911.395[	1585	0.106
LL	]220.787, 228.823[	]911.589, 974.64[	1400	0.039
<i>MP_Net14_2_NAC</i>				
DD	]219.749, 224.222[	]1440.1, 1483.98[	2400	1.939
DL	]219.281, 225.71[	]1428.52, 1491.13[	1200	0.971
LD	]225.036, 232.263[	]1495.88, 1559.48[	1400	0.142
LL	]224.892, 229.57[	]1485.71, 1527.75[	2600	0.047

* intervalo de confiança a 95%; n tamanho da amostra; Δ_t tempo médio de obtenção de cada resultado amostral (em segundos).

Tabela C.83: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net14_1_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	s_a	Y_a
1	0.66	85	0	85	26	1.38	4	166	4
2	1.5	2	85	2	27	0.71	4	162	4
3	1.32	11	87	11	28	1.5	15	147	15
4	1.1	10	85	10	29	1.25	3	189	3
5	1.39	3	87	3	30	1.07	5	184	5
6	0.79	3	87	3	31	1.35	6	178	6
7	0.5	8	98	8	32	1.04	3	129	3
8	0.81	20	95	20	33	1.21	4	125	4
9	0.74	8	98	8	34	0.58	29	118	29
10	0.86	3	95	3	35	0.5	28	95	28
11	1.12	3	95	3	36	0.74	13	111	13
12	1.07	11	98	11	37	0.5	3	149	3
13	1.06	1	106	1	38	0.57	20	121	20
14	0.86	1	90	1	39	1.13	9	129	9
15	1.31	5	109	5	40	0.52	22	141	22
16	0.93	3	115	3	41	0.75	9	197	9
17	0.61	42	106	42	42	1.5	5	192	5
18	1.49	11	107	11	43	0.85	10	155	10
19	1.5	1	148	1	44	1.28	3	152	3
20	1.5	4	91	4	45	1.46	10	176	10
21	0.69	21	90	21	46	0.95	11	165	11
22	1.08	11	114	11	47	0.71	11	138	11
23	0.75	11	118	11	48	1.06	1	163	1
24	0.85	23	98	23	49	1.5	14	206	14
25	1.5	8	170	8					

$$T = 220 \quad C = 879.41$$

Tabela C.84: Alocação e escalonamento obtidos para MP_Net14_2_NAC, na configuração DD.

a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a	a	$x_{a,1}$	$Y_{a,1}$	$x_{a,2}$	$Y_{a,2}$	s_a	Y_a
1	1.09	73	1.3	45	0	73	26	0.63	4	0.83	6	139	6
2	—	—	0.69	15	73	15	27	0.82	9	1.18	15	124	15
3	—	—	1.47	1	88	1	28	0.99	12	0.78	4	112	12
4	1.26	8	0.95	12	73	12	29	—	—	0.68	7	164	7
5	0.58	88	0.62	3	88	88	30	0.5	1	0.87	5	159	5
6	0.87	1	0.94	9	88	9	31	1.42	4	1.03	8	151	8
7	1.39	2	1.26	9	89	9	32	1.34	7	—	—	104	7
8	1.05	10	0.91	1	85	10	33	0.86	11	0.88	4	95	11
9	—	—	1.28	2	89	2	34	0.9	4	1.02	2	108	4
10	0.64	2	1.31	9	85	9	35	1.05	2	0.84	1	184	2
11	—	—	0.76	4	85	4	36	1.41	1	1.08	3	108	3
12	0.79	1	0.97	4	89	4	37	0.8	1	0.51	1	96	1
13	1.04	4	0.88	2	98	4	38	0.79	7	1.47	1	108	7
14	1.25	5	—	—	176	5	39	1.38	2	1.44	5	106	5
15	0.94	1	—	—	93	1	40	1.32	3	0.57	5	115	5
16	0.9	7	—	—	95	7	41	0.81	38	0.96	2	178	38
17	1.44	1	0.6	4	91	4	42	0.68	7	—	—	171	7
18	1.04	6	1.13	2	102	6	43	0.84	4	0.9	1	111	4
19	1.29	1	0.7	1	95	1	44	0.77	1	—	—	97	1
20	1.44	3	0.96	2	181	3	45	0.61	2	—	—	189	2
21	1.12	5	0.88	11	97	11	46	1.15	1	0.51	3	186	3
22	1.01	1	1.32	1	94	1	47	0.85	10	0.98	3	111	10
23	1.43	2	—	—	102	2	48	1.17	1	1.07	4	120	4
24	1.16	3	0.59	14	94	14	49	0.61	6	0.81	4	216	6
25	0.67	6	1.22	3	145	6							

$$T = 222 \quad C = 1463.94$$