



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS - EM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO-
DEPRO



EDUARDO HENRIQUE REIS MONTALVÃO

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA
MISTA PARA O PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO
DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL COM RESTRIÇÃO
DE RECURSOS**

OURO PRETO - MG

2011

EDUARDO HENRIQUE REIS MONTALVÃO

montalvao.edu@gmail.com

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA
MISTA PARA O PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO
DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL COM RESTRIÇÃO
DE RECURSOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do Grau de Engenheiro de Produção.

Professor orientador: Msc. André Luís Silva

OURO PRETO – MG
2011

EDUARDO HENRIQUE REIS MONTALVÃO

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA
MISTA PARA O PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO
DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL COM RESTRIÇÃO
DE RECURSOS**

Monografia julgada e aprovada em 20 de Julho de 2011 como requisito parcial para obtenção de grau em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Ouro Preto.

BANCA EXAMINADORA

Prof. André Luís Silva, MSc.
Universidade Federal de Ouro Preto
Orientador

Prof^ª. Clarice da Silva Vieira, DSc.
Universidade Federal de Ouro Preto
Examinadora

Prof^ª. Lásara Fabrícia Rodrigues, MSc.
Universidade Federal de Ouro Preto
Examinadora

Prof. Magno Silvério Campos, MSc.
Universidade Federal de Ouro Preto
Examinador

Prof. Marcone Jamilson Freitas Souza, DSc.
Universidade Federal de Ouro Preto
Examinador

Dedico este trabalho aos meus pais, Gilca e David, que com sabedoria e confiança sempre me apoiaram nos momentos de escolha. Ao meu irmão José, pela amizade e companheirismo. À minha namorada Roberta, pela compreensão, força, paciência e carinho infinitos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que por sua imaterialidade e equilíbrio, faz-nos pensar sobre o quanto de nós é possível eternizar naquilo que é justo e fraterno.

Aos meus pais, Gilca e David, sempre dispostos a ouvir e enaltecer a importância fundamental do seio familiar.

Ao meu orientador, André Luís Silva, pela amizade, companheirismo, dedicação, empenho e ajuda prestados em todos os trabalhos desenvolvidos, sobretudo esta monografia.

Ao Magno Campos, mestre e amigo, pela força e incentivo prontamente disponíveis.

A todos os mestres dos quais já fui aprendiz, pelo entusiasmo em mostrar que o aprender não tem limites.

À Roberta, que em todo o seu amor e carinho sabe ouvir, aconselhar e compreender, sempre ao lado, vivendo conjuntamente a expectativa de todos os momentos desta trajetória.

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original.”*

(Albert Einstein)

*“Viva como se fosse morrer amanhã. Aprenda
como se fosse viver para sempre.”*

(Mahatma Gandhi)

RESUMO

MONTALVÃO, Eduardo Henrique Reis. Modelo de Programação Linear Inteira Mista para o Problema de Sequenciamento de Manutenção com Restrição de Recursos. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Ouro Preto.

O presente trabalho apresenta um modelo de programação linear inteira mista para resolver o problema de sequenciamento de manutenção com restrição de recursos. O objetivo da formulação é encontrar uma sequência de execução que minimize o *makespan* das Ordens de Manutenção (OM), considerando-se a limitação dos recursos disponíveis. Os recursos são alocados de tal forma que todas as OM's sejam executadas na sequência e no tempo determinados. A importância de se ter um sequenciamento eficiente das OM's se dá pelo aumento da disponibilidade operacional e pela redução dos custos com a utilização dos recursos de manutenção. Foram realizadas oito aplicações do modelo apresentado, considerando-se variações na quantidade e nos tipos de recursos, quantidade de OM's e tempos de execução. A modelagem foi implementada em MPL (*Mathematical Programming Language*), utilizando-se como otimizador o software *GLPK 4.4*. Os resultados obtidos mostraram-se viáveis para a aplicação do modelo em um horizonte de planejamento com cerca de 20 OM's. A utilização do modelo na resolução deste problema auxilia o programador de OM's na sua rotina de trabalho, agilizando-a e oferecendo soluções mais confiáveis para a programação das Ordens de Manutenção.

Palavras-chave: programação da manutenção; problema sequenciamento da manutenção; sequenciamento da manutenção com restrição de recursos; programação linear inteira.

ABSTRACT

This research presents a mixed integer linear programming model to solve the resource-constrained maintenance scheduling problem. The aim of the formulation is find an execution sequence that minimizes the *makespan* of the maintenance orders (MO), considering the limitation of available resources. The resources are allocated so they are all executed in determined time and sequence. The importance of having an efficient MO scheduling is given by the increasing of the operational availability and lower cost with the use of maintenance resources. The model were performed in eight applications, take into account variations about quantity and types of resources, MO's number and execution time. The modeling were implemented in *Mathematical Programming Language* (MPL), and the software GLPK 4.4 was used as optimizer. The results proved to be viable to the application of the model in a planning horizon of about 20 MOs. Use of the model in solving this problem helps the programmer in your work routine, streamlining it and providing more reliable solutions to the programming of maintenance orders.

Keywords: maintenance scheduling; maintenance scheduling problem; resource-constrained maintenance scheduling; integer linear programming.

LISTA DE SIGLAS

ABRAMAN	Associação Brasileira de Manutenção
CPM	<i>Critical Path Method</i>
GLPK	<i>Gnu Linear Programming Kit</i>
GUSEK	<i>GLPK Under Scite Extended Kit</i>
OM	Ordem de Manutenção
MPL	<i>Mathematical Programming Language</i>
PCM	Planejamento e Controle da Manutenção
PSM	Problema de Sequenciamento de Manutenção
PSMRR	Problema de Sequenciamento de Manutenção com Restrição de Recursos
PSRR	Problema de Sequenciamento com Restrição de Recursos
PSA	Problema de Sequenciamento de Atividades
PERT	<i>Program Evaluation and Review Technique</i>

LISTA DE CONCEITOS

<i>Criticidade</i>	Grau de importância de um equipamento no funcionamento de um sistema. Quanto mais importante ao sistema, maior a criticidade do ativo.
<i>Disponibilidade operacional</i>	Porcentagem de tempo em que um sistema encontra-se disponível para operação. Também interpretado como a probabilidade de que um sistema esteja em condição operacional em um instante t .
<i>Gráfico de Gantt</i>	Gráfico utilizado para representar o avanço de diferentes etapas de um projeto ou conjunto de atividades relacionadas.
<i>PERT/CPM</i>	Sistemas de gerenciamento e coordenação de projetos de grande porte.
<i>Backlog</i>	Tempo que uma equipe de manutenção deve trabalhar para concluir todos os serviços pendentes, com toda a sua força de trabalho, e se não forem adicionadas novas pendências durante a execução dos serviços até então registrados e pendentes em posse da equipe de Planejamento e Controle de Manutenção.
<i>Manutenção preventiva</i>	É todo o serviço de manutenção realizado em máquinas que não estejam em falha, efetuados em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios prescritos, destinados a reduzir a probabilidade de falha.
<i>Confiabilidade</i>	Probabilidade de que um componente, equipamento ou sistema exercerá sua função sem falhas, por um período previsto, sob condições de operação especificadas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Fluxograma resumido do Planejamento e Controle de Manutenção.	22
Figura 5.1 – Grafo representativo das OMs para a Aplicação 1.....	34
Figura 5.2 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 1.....	35
Figura 5.3 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 1 para a Aplicação 1.	36
Figura 5.4 – Grafo representativo das OMs para a Aplicação 2.....	36
Figura 5.5 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 2.	37
Figura 5.6 – Grafo representativo do fluxo do recursos tipo 1 para a Aplicação 2.....	38
Figura 5.7 – Grafo representativo do fluxo do recursos tipo 2 para a Aplicação 2.....	38
Figura 5.8 – Grafo representativo das OMs para a Aplicação 3.....	39
Figura 5.9 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 3.	39
Figura 5.10 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 1 para a Aplicação 3.	40
Figura 5.11 – Grafo representativo das OMs para a Aplicação 4.....	41
Figura 5.12 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 4.	41
Figura 5.13 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 1 para a Aplicação 4.	42
Figura 5.14 - Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 2 para a Aplicação 4.	42
Figura 5.15 – Grafo representativo das OMs para a Aplicação 5.....	43
Figura 5.16 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 5.	43
Figura 5.17 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 1 para a Aplicação 5.	44
Figura 5.18 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 6.	45
Figura 5.19 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 1para a Aplicação 6.	46
Figura 5.20 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 2para a Aplicação 6.	46
Figura 5.21 – Grafo representativo das OMs para a Aplicação 7.....	47
Figura 5.22 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 7.....	47
Figura 5.23– Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 1para a Aplicação 7.	48
Figura 5.24 – Grafo representativo das OMs para a Aplicação 8.....	49
Figura 5.25 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 8.	49
Figura 5.26 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 1para a Aplicação 8.	50
Figura 5.27 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 2 para a Aplicação 8.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Dados para exemplos 1 a 4.....	33
Tabela 5.2 – Dados para exemplos 5 a 8.....	33
Tabela 5.3 – Resumo dos resultados das aplicações o modelo.....	51

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS.....	IX
LISTA DE CONCEITOS.....	X
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XII
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO AO ESTUDO.....	1
1.1 Introdução	1
1.2 Motivação do estudo	2
1.3 Objetivos do trabalho	3
1.4 Organização do trabalho	4
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Introdução	5
2.2 As Políticas de Manutenção e o sequenciamento	5
2.3 O Sequenciamento clássico e a Manutenção	7
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	20
3.1 Classificação da pesquisa.....	20
3.2 Delimitação e descrição do universo abordado	20
3.3 Dados utilizados nas aplicações do modelo.....	23
3.4 Software e ferramentas utilizadas para modelagem matemática e aplicação do modelo	23
CAPÍTULO 4 – MODELAGEM MATEMÁTICA PROPOSTA.....	25
4.1 Introdução	25
4.2 Formulação básica do PSRR.....	13
4.3 Considerações sobre a aplicação do modelo de PSRR ao PSMRR	25
4.4 Parâmetros e variáveis do modelo	26
4.5 Modelo proposto	27
4.6 Discussões sobre o modelo	29
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5.1 Introdução	31
5.2 Definição do problema.....	31

5.3	Parâmetros de aplicação.....	32
5.4	Aplicações.....	34
5.5	Considerações gerais sobre os resultados	51
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES		53
REFERÊNCIAS.....		55

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO AO ESTUDO

1.1 Introdução

A conotação dada às atividades de manutenção como função estratégica voltada aos objetivos e resultados organizacionais da empresa é recente. Em contraponto à visão tradicional de que a missão da manutenção é reestabelecer as condições originais dos equipamentos/ sistemas (KARDEC et al., 2007), Xenos (2004) destaca que o objetivo fundamental da manutenção (produtiva) é aplicar a melhor combinação dos seus métodos a fim de não prejudicar a produção. Para tanto, o gerenciamento eficiente da Manutenção envolve algumas funções de apoio, a saber (XENOS, 2004): Tratamento de falhas dos equipamentos, Padronização da Manutenção, Peças-reservas (sobressalentes) e Almoxarifado, Educação e Treinamento, Orçamento e Planejamento.

Dentre as funções elencadas acima, o planejamento ganha destaque por estar intrinsecamente relacionado às demais funções de apoio. Nessa linha, o setor da empresa responsável pelo Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) concentra as atribuições de planejamento, programação e coordenação de materiais. Além disso, as responsabilidades do PCM compreendem o gerenciamento dos Planos de Manutenção, a coordenação e o tratamento das inspeções, o gerenciamento dos cadastros da Manutenção, a programação de serviços e paradas e o controle dos índices de Manutenção (VIANA, 2002).

O objetivo da Manutenção é a intervenção estritamente necessária para garantir a disponibilidade de um equipamento/ sistema. Dessa forma, a programação das Ordens de Manutenção (OMs) pelo PCM é de crucial importância. A programação eficiente das OMs contribui para que se tenha uma intervenção de qualidade, com a correta alocação dos recursos, a mínima incidência de imprevistos e o menor tempo possível.

A preocupação com a disponibilidade operacional é ratificada pelos dados do Documento Nacional – Ano 2009 da Associação Brasileira de Manutenção (ABRAMAN), sobre a situação da Manutenção nas empresas brasileiras. Segundo este documento, tem-se a disponibilidade operacional como o principal indicador de desempenho da Manutenção.

Conforme ressaltado em Mobley et al. (2008), a disponibilidade dos equipamentos é afetada por tempos de inatividade programados e não programados. Os

tempos não programados constituem eventos aleatórios de falhas do sistema, enquanto que a inatividade programada advém da necessidade de intervenção (preventiva ou preditiva) previamente identificada e repassada ao programador, que realizará o seu sequenciamento.

Em Viana (2002), encontra-se uma descrição sumária sobre os graus de priorização que devem ser atribuídos às OMs, bem como a dinâmica de utilização de técnicas do Gráfico de Gantt e PERT-CPM para auxiliar a programação de Manutenção. Priorizar uma OM significa sequenciá-la conforme um critério de execução ao longo do tempo. Tais critérios são oriundos do consenso entre as diversas áreas que compõem a planta industrial, com os objetivos de garantir a flexibilidade necessária à manutenção e a máxima disponibilidade do sistema.

Posto dessa forma, percebe-se que sequenciar as OMs não é trivial. Compõe-se de uma tarefa que envolve objetivos conflitantes e dependente de fatores como disponibilidade dos recursos (sobretudo mão-de-obra especializada), relações entre duas ou mais OMs e seus respectivos tempos de execução, graus de priorização e criticidade do equipamento entre outros. Nessa linha, o problema do sequenciamento na manutenção, conforme a abordagem adotada neste trabalho, busca realizar a programação das OMs. Essa programação deve respeitar todos os critérios restritivos e ainda incorrer no menor tempo possível de parada da planta, tal que a disponibilidade operacional seja a maior possível.

Nesse contexto, a utilização de técnicas de otimização linear para o sequenciamento das atividades de manutenção é pertinente, pois agiliza o processo decisório e aumenta o grau de assertividade do programador. As técnicas e modelos de otimização não substituem os tomadores de decisão, são ferramentas que auxiliam e direcionam os problemas para resultados focados (ARENALES et al., 2007).

1.2 Motivação do estudo

Grande ênfase é dada a ferramentas, técnicas e metodologias que abordam os aspectos gerenciais do Planejamento e Controle da Manutenção. Fundamentais para a estruturação e o desenvolvimento consistentes das atividades desse setor, tais estratégias estão bastante voltadas aos aspectos organizacionais (fluxos de inspeção, documentações, Planos etc.) e técnicos (análise de falhas, especificações de equipamentos, padronização). Por causa

disso, a necessidade de se ter uma programação eficiente das OMs é por vezes negligenciada, destituindo a manutenção de seu caráter estratégico. Nesse contexto, um fator motivador do presente trabalho é a possibilidade de inserção de técnicas de programação linear no sequenciamento das atividades de manutenção. A otimização no contexto da programação do PCM dinamiza e aumenta a confiabilidade nas decisões tomadas.

Ademais, percebe-se na literatura nacional que grande parte das aplicações dos problemas de sequenciamento na indústria está ligada diretamente à produção. Este fato evidencia sobremaneira a necessidade de se dar o devido tratamento à programação de OMs. Dessa forma, a escassez de estudos relativos ao sequenciamento da manutenção em âmbito nacional constitui outra motivação desta monografia.

1.3 Objetivos do trabalho

1.3.1 Objetivo geral

Apresentar um modelo de Programação Linear Inteira Mista para o Problema de Sequenciamento de Manutenção com Restrição de Recurso (PSMRR). O objetivo do modelo é reduzir o tempo total de execução das atividades de manutenção programada em um ambiente fabril e alocar os recursos de manutenção às atividades programadas.

1.3.2 Objetivos específicos

Para se atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

1. Realizar um levantamento bibliográfico acerca do PSM e do PSMRR;
2. Com base nas características do PSMRR, apresentar um modelo de Programação Linear Inteira Mista que represente o problema estudado;

3. Implementar computacionalmente o modelo sugerido;
4. Analisar os resultados do modelo com base em algumas aplicações;
5. Fazer algumas considerações sobre o modelo proposto/resultados atingidos.

1.4 Organização do trabalho

A presente monografia foi organizada em seis capítulos. Uma descrição sumária de cada um deles é fornecida abaixo.

O Capítulo 1 é a introdução ao tema abordado. Nele é apresentado o contexto geral em que a programação das atividades de manutenção é realizada nas empresas. A intenção é ambientar o leitor no assunto tratado. Apresentam-se ainda a motivação e os objetivos do estudo, bem como a sua estruturação.

No Capítulo 2 é feito um estudo bibliográfico sobre o tema proposto. Longe de esgotar o assunto, são apresentados os conceitos e algumas abordagens encontradas na literatura para o Problema de Sequenciamento de Manutenção (PSM) e para o PSMRR. A base para o desenvolvimento do modelo estudado neste trabalho também é apresentada neste capítulo.

A metodologia do trabalho é descrita no Capítulo 3, que contempla a natureza da pesquisa, a caracterização do universo a ser estudado, bem como os recursos que foram utilizados para a implementação do modelo.

O Capítulo 4 apresenta o modelo para o PSMRR, seus parâmetros e variáveis de decisão, bem como suas características. São feitas ainda algumas considerações importantes sobre a formulação proposta.

No Capítulo 5 estão descritos os resultados obtidos utilizando-se o modelo apresentado ao PSMRR. São realizados testes em algumas instâncias, com seus respectivos comentários e análises acerca do comportamento do modelo.

No capítulo 6, finaliza-se esta monografia com algumas conclusões, seguidas de sugestões propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada uma revisão teórica acerca dos tratamentos dados aos Problemas de Sequenciamento de Manutenção (PSM). O objetivo aqui não é esgotar o tema, mas tão somente apresentar algumas abordagens que sirvam de alicerce às pretensões do presente trabalho. Para tanto, apresenta-se primeiramente na seção 2.2 uma contextualização do PSM no que concerne às principais políticas de gerenciamento da Manutenção comumente empregada nas empresas. Em seguida, na seção 2.3, preocupou-se em evidenciar as origens do tratamento do PSM como um problema de sequenciamento de tarefas. Posteriormente, na seção 2.4, apresenta-se algumas abordagens quantitativas ao PSM. Na seção 2.5 descreve a formulação básica dos problemas de sequenciamento com restrições de recursos, o qual é a base de desenvolvimento do modelo apresentado.

Por fim, encerra-se o capítulo na seção 2.6 apresentando os casos particulares do PSM em que a restrição na disponibilidade de recursos representa um fator importante quando da modelagem e resolução do PSM. O PSM com restrição de recursos, ou PSMRR, constitui-se o maior interesse deste trabalho.

2.2 As Políticas de Manutenção e o sequenciamento

A Manutenção é a atividade na qual são executadas algumas tarefas de reparo/ reposição/ substituição a intervalos de tempo específicos, a fim de estender a vida útil dos equipamentos (SHARMA et al., 2011). Reason (2000) define a Manutenção como o montante de atividades requeridas para conservar uma planta produtiva em seu estado original de capacidade de produção.

Conforme ressaltam Paz & Leigh (1994), as políticas de manutenção para a confiabilidade dos sistemas podem ser classificadas em dois grupos distintos, quais sejam:

- Políticas para reduzir a frequência de falhas:
 - Manutenção preventiva;
 - Substituição antecipada de componentes/ equipamentos;
 - Manutenção preditiva;
 - *Overbuilding of equipment*.
- Políticas para reduzir a severidade das falhas:
 - Agilizar os reparos por meio de projetos modulares dos equipamentos (*speeding the repair task by modular equipment design*);
 - Utilizar uma saída alternativa para a produção durante o reparo, através de rotinas de trabalho diferentes, uso de máquinas *stand by* ou estoque em processo.

O sequenciamento da manutenção está fortemente centrado na política de manutenção preventiva. Dessa forma, as Ordens de Manutenção (OMs) a que se referem este trabalho são todas de caráter preventivo e, portanto, são previamente identificadas e planejadas, conforme será descrito no Capítulo 3. Entretanto, por razões de objetividade e escopo, as principais políticas de manutenção são apenas mencionadas nesta monografia, como forma de situar o tema abordado no contexto do gerenciamento da Manutenção. Maiores informações acerca do assunto poderão ser encontradas nos trabalhos de Paz & Leigh (1994), Azevedo (2007), Lafraia (2008), Mobley et al (2008), Sharma et al (2011) dentre outros.

Kister & Hawkins (2006) definem o Sequenciamento da Manutenção como o processo pelo qual os recursos são alocados em atividades específicas previamente definidas, considerando-se suas respectivas necessidades e níveis de habilidade requeridos. O propósito, neste caso, é garantir que tais recursos – humanos e materiais – estejam disponíveis no momento exato em que a tarefa será executada. Esta é uma abordagem essencialmente voltada aos recursos, e não se preocupa com a distribuição temporal e nem com a ordem de execução das atividades.

Gober (2008) amplia o foco do sequenciamento ao destacar que os objetivos da manutenção estão traduzidos na sequência em que as atividades são realizadas. O autor enfatiza que a ordem de realização das tarefas é determinada pelo *backlog*. Deste modo, as OMs mais antigas no rol das intervenções programadas devem ser priorizadas quanto à ordem em que serão executadas. Percebe-se, a partir daí, maior preocupação com as datas de execução das OMs.

Isso posto, a próxima seção inicia a descrição do sequenciamento da manutenção como um problema de sequenciamento de tarefas. Apresentam também uma revisão que mescla a origem do tema com algumas abordagens encontradas na literatura.

2.3 O Sequenciamento clássico e a Manutenção

A discussão inicial é baseada no trabalho de Paz & Leigh (1994).

A atividade de Manutenção pode ser entendida efetivamente como um problema de sequenciamento do tipo *job shop* (JSSP). Formulado como um problema de otimização, o JSSP generalizado consiste em achar uma sequência de processamento dos n trabalhos nas m máquinas tal que sejam respeitadas as restrições de precedência (também denominadas restrições tecnológicas). O valor ótimo do sequenciamento atende a algum critério de desempenho. De maneira similar, o Problema de Sequenciamento de Manutenção (PSM) pode ser modelado como um JSSP:

- Um *job* no JSSP pode ser entendido como uma Ordem de Manutenção (OM) que deve ser processada;
- As máquinas no JSSP são denotadas como sendo trabalhadores de manutenção.

Entretanto, o PSM é mais abrangente e consequentemente mais complexo do que o JSSP clássico. Os pressupostos básicos do JSSP para sua formulação são normalmente inapropriados ao ambiente de manutenção, pois distanciam a modelagem da realidade analisada. São eles (PAZ & LEIGH, 1994):

1. **Cada trabalho, denotado por uma OM, é uma entidade:** uma OM pode ser processada por um ou mais trabalhadores dependendo das habilidades necessárias à tarefa e do tamanho do *job*. Este pressuposto requereria trabalhadores para processar cada operação da OM em sequência. Os trabalhadores não podem trabalhar simultaneamente na mesma OM. Isto afeta a programação das OMs.
2. **Preempção não permitida:** a preempção é importante para o ambiente de manutenção. Se uma falha grave e de alto custo para a produção ocorre, os *jobs* correntes serão interrompidos a fim de prover a mão-de-obra necessária para atender à emergência. Para o ambiente de manutenção, a preempção permite que:

- a. Trabalhadores sejam alocados a uma OM com a consciência de que, caso haja uma falha emergencial, os mesmo sejam realocados; e,
 - b. OMs sejam executadas em estágios. A preempção permite que apenas uma fração do trabalho seja executada.
- 3. **Cada *job* tem m operações distintas, cada uma em uma máquina:** o ambiente de manutenção é modelado como se os trabalhadores fossem as máquinas. Isto permite ao pessoal de manutenção processar mais de uma tarefa por OM, dependendo das habilidades de cada um.
- 4. **O cancelamento não é permitido:** cancelar *jobs* em uma data não especificada transforma o problema de determinístico para estocástico. A razão mais comum para que isto ocorra na manutenção é o fato de uma OM poder ser executada por um operador e não por um manutentor. Com isso, o manutentor não será necessário, e a tarefa poderá ser cancelada. Outro motivo para o cancelamento de tarefas é a substituição de pequenos componentes dos equipamentos, quando permitido, pelo pessoal da operação.
- 5. **Os tempos de processamento são independentes da sequência:** o tempo de processamento geralmente inclui qualquer tempo requerido para ajustes ou mesmo *setup* da máquina para processar a tarefa. Isto também inclui qualquer tempo necessário para transportar o *job* e seus respectivos recursos para a máquina. Entretanto, a execução das OMs poderão ser dependentes da sequência. Um trabalhador será alocado a duas OMs em sequência devido a fatores locais, por exemplo.
- 6. **É permitido estoque em processo:** este pressuposto permite folgas entre a execução de dois *jobs*. Para a manutenção, isto é equivalente a permitir que membros de uma mesma OM executem partes da tarefa em tempos diferentes.
- 7. **Há apenas um tipo de cada máquina:** esta condição não é válida para um ambiente com máquinas paralelas ou sequenciamento de multiprocessos. Uma vez que os manutentores são modelados como máquinas, eles se enquadram no caso em que as máquinas paralelas são permitidas. Dois trabalhadores podem ter as mesmas habilidades e podem desempenhar as mesmas operações, mas seus tempos de execução podem ser diferentes.
- 8. **As máquinas podem ficar ociosas:** significa que a ociosidade dos trabalhadores será permitida no PSM.
- 9. **Uma máquina processa apenas um *job* por vez:** um manutentor pode trabalhar em duas ou mais OMs ao mesmo tempo. As tarefas podem ser combinadas, executadas em sequência, ou mesmo processadas paralelamente. Ao assumir este pressuposto no

ambiente de manutenção, é possível diminuir a complexidade do problema de sequenciar a mão-de-obra, desde que o resultado seja mais realista no contexto analisado.

10. **As máquinas estão sempre disponíveis em todo o horizonte considerado:** significa considerar que os trabalhadores estão sempre disponíveis. Entretanto, eles podem adoecer, sofrer algum acidente de trabalho e tornarem-se indisponíveis durante o horizonte de tempo. Além disso, o trabalhador pode necessitar de uma ferramenta que não se encontra ao seu alcance ou mesmo que não esteja em boas condições de uso, obrigando-o a interromper o trabalho.
11. **As restrições tecnológicas são conhecidas *a priori* e são imutáveis:** isto significa que, na manutenção, as OMs deveriam ser programadas em uma ordem de precedência específica. Entretanto, existem tarefas no ambiente de manutenção que são executadas de acordo com a disponibilidade de recursos.
12. **Não há aleatoriedade:** em particular,
 - a. O número de *jobs* é conhecido e fixo;
 - b. O número de máquinas é conhecido e fixo;
 - c. Os tempos de processamento são conhecidos e fixos
 - d. As datas de término são conhecidas e fixas; e,
 - e. Qualquer outro valor necessário para definir um problema em particular é conhecido e fixo.

No ambiente de manutenção, poucos desses fatores são plenamente determinísticos.

É evidente, portanto, que a modelagem do PSM como um caso do JSSP requer modificações importantes tanto em termos de objetivo quanto no que concerne às restrições (PAZ & LEIGH, 1994). A seguir serão apresentadas algumas modelagens que apresentam alternativas voltadas à resolução do PSM.

2.4 Abordagens quantitativas ao Sequenciamento de Manutenção

A ideia de se tratar o sequenciamento da manutenção como um problema de otimização é relativamente recente. Wagner et al. (1964) foram os primeiros a apresentar um modelo de programação linear inteira para o PSM. Para esses autores, a tarefa de programar a

manutenção preventiva envolve determinar quando a mão-de-obra será alocada para a execução de um determinado conjunto de OMs ou projetos.

Wagner et al. (1964) propõem cinco modelos de programação linear inteira para o PSM. As variações entre um modelo e outro se dão essencialmente em relação aos critérios de otimalidade da função objetivo. O propósito principal no trabalho dos autores é encontrar uma programação preventiva factível em relação à alocação da mão-de-obra, tal que a flutuação deste recurso seja minimizada ao longo do horizonte de programação. Por seu pioneirismo, descreve-se abaixo a modelagem proposta por Wagner et al. (1964):

Dados do modelo

- S : conjunto de períodos ou horizonte de programação;
- P : conjunto de projetos;
- S_p : conjunto das possíveis datas de início para o projeto p ;
- T_p : número de períodos necessários para a realização do projeto p ;
- M_{pt} : número de Homens-hora (Hh) necessários para a execução do projeto p na semana t .

Variáveis de decisão

- $x_{ps} = \begin{cases} 1, & \text{se o projeto } p \text{ é iniciado na semana } s; \\ 0, & \text{c. c.} \end{cases}$
- $D(w)$: desvio de mão-de-obra requerida entre o período w e $w+I$;
- $D_{pt} = \begin{cases} M_{pt} - M_{p(t+1)}, & \text{se } 1 \leq t \leq T_p; \\ 0, & \text{c. c.} \end{cases}$
- G_w : aumento da mão-de-obra requerida entre o período w e $w+I$;
- H_w : decréscimo de mão-de-obra requerida entre a semana w e $w+I$;

Modelo

$$\text{Minimizar} \quad Z = \sum_{w=1}^{S-1} G_w + H_w \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a:} \quad \sum_{s \in S_p} x_{ps} = 1 \quad \forall p = 1, 2, \dots, P \quad (2)$$

$$M_{pt} - M_{p(t+1)} = D_{pt} \quad \forall p = 1, 2, \dots, P; \quad 1 \leq t \leq T_p \quad (3)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{s \in S_p} D_{p(w-s+1)} x_{ps} = D(w) \quad \forall w = 1, 2, \dots, S-1 \quad (4)$$

$$D(w) + G_w - H_w = 0 \quad \forall w = 1, 2, \dots, S-1 \quad (5)$$

$$G_w \geq 0 \quad \forall w = 1, 2, \dots, S-1 \quad (6)$$

$$H_w \geq 0 \quad \forall w = 1, 2, \dots, S-1 \quad (7)$$

A função objetivo em (1) minimiza a flutuação do recurso ao longo do horizonte de planejamento. Em (2), garante-se que o projeto p terá seu início exatamente em um período s do horizonte de programação. O conjunto de restrições (3) apresenta a variação na demanda de mão-de-obra para o projeto p entre os períodos t e $t + 1$. As restrições (4) apresentam o cálculo do desvio total da demanda de mão-de-obra requerida para a realização de todos os projetos, entre os períodos w e $w + 1$ do horizonte de programação. Já em (5) tem-se o acréscimo G_w e o decréscimo H_w entre os períodos w e $w + 1$. É relevante notar que $G_w - H_w$ representa a variação da mão-de-obra requerida entre o período w e $w + 1$ do calendário. Por fim, definem-se os domínios das variáveis em G_w e H_w , respectivamente, em (6) e (7).

Uma evolução do modelo proposto por Wagner et al. (1964) é a formulação apresentada em Azevedo (2007). Neste caso, a autora utilizou-se de um estudo de caso em uma empresa fabricante de componentes microeletrônicos. A adaptação do modelo incluiu algumas restrições adicionais e modificou outras, desta vez com o objetivo expresso na função objetivo de realizar o sequenciamento das atividades minimizando os custos inerentes à manutenção preventiva, quais sejam: custo de execução efetiva, custos por antecipação e atrasos na realização das tarefas, custos de subutilização e de sobrecarga da mão-de-obra, custos de contratação e demissão de mão-de-obra. A formulação para o PSM apresentada por Azevedo (2007) acrescenta ainda o conceito de sinergia entre projetos de manutenção preventiva distintos.

Em Budai et al. (2006), os autores apresentam dois modelos de programação linear inteira mista para o PSM. A função objetivo minimiza os custos totais de manutenção e os custos de penalidade por antecipação de atividades de manutenção consecutivas em ambos os modelos. Budai et al. (2006) fornecem ainda importante contribuição teórica ao apresentar e provar um teorema sobre a estrutura *NP-hard* do PSM. Os autores aplicam seus modelos no estudo de caso do sequenciamento da manutenção em linhas de trem.

Canto (2006) apresenta um modelo de programação linear inteira mista para o PSM. O objetivo é minimizar o custo total das diversas operações de manutenção preventiva de uma usina de geração de energia, considerando um determinado horizonte de planejamento. O autor utiliza a técnica de decomposição de Benders na resolução do modelo.

Em outra perspectiva, Quan et al. (2007) utilizam algoritmos evolucionários para resolver um problema de sequenciamento de manutenção preventiva multiobjetivo. Neste caso, a formulação proposta consiste em minimizar tanto o *makespan* quanto os custos com a mão-de-obra. Neste caso, têm-se objetivos conflitantes, uma vez que reduzir o número de trabalhadores faz com que o tempo total do sequenciamento e execução das atividades aumente. Os custos com mão-de-obra consistem no *hiring cost* requeridos dos trabalhadores para completar as OM's em tempo hábil, bem como do custo de ociosidade. Por sua vez, o *makespan* refere-se ao tempo total necessário para se completar todas as OM's programadas. Os autores assumem ainda que os trabalhadores possuem duas habilidades distintas (mecânica e solda, por exemplo), e que cada trabalhador só pode desempenhar apenas uma delas.

Moghaddam (2008) apresentam dois modelos de otimização ao PSM, e os resolvem utilizando técnicas exatas, heurísticas e meta-heurísticas. O problema se resume em encontrar a melhor sequência das atividades de manutenção para cada componente no sistema em cada período do horizonte de planejamento, tal que os custos totais são minimizados. As restrições consideradas neste caso incluem aspectos relativos à confiabilidade do sistema e ao orçamento disponível.

Diante do exposto percebe-se que um dos objetivos principais em relações às diversas abordagens ao PSM é a redução de custos, em que não existe uma preocupação aparente com a limitação na quantidade de mão-de-obra disponível. Na subseção seguinte têm-se alguns relatos do PSM disponíveis na literatura em que se considera, dentre outros aspectos, a restrição da mão-de-obra.

2.5 Formulação básica do Problema de Sequenciamento com Restrição de Recursos

A formulação básica do PSRR considerada no presente trabalho é proposta em Artigues et al. (2003). No modelo proposto por esses autores, as atividades do projeto são consideradas nós de uma rede. Os arcos, por sua vez, representam as relações de precedência entre as atividades, indicando aquelas que podem ser executadas em paralelo ou respeitando uma sequência específica. No último caso, a sequência de execução das atividades deve ser respeitada, o que não significa que tais atividades serão imediatamente subsequentes. Por fim, o fluxo na rede representa a distribuição dos recursos ao longo das atividades do projeto.

A formulação proposta em Artigues et al. (2003) considera um ambiente estático. Isto significa dizer que o modelo encontra uma solução para o problema de sequenciamento ao determinar as datas de início de um conjunto conhecido de atividades sujeito a recursos determinísticos e restrições de precedência. Artigues et al. (2003) tratam o problema por meio de uma abordagem baseada em fluxo ao considerarem os recursos como renováveis.

Isso posto, sejam:

- $V = \{1, 2, \dots, n\}$: conjunto das n atividades do projeto;
- $R = \{1, 2, \dots, m\}$: conjunto dos m recursos renováveis;
- E : conjunto das atividades cuja relação de precedência é conhecida a priori, ou seja, a atividade j só será iniciada após a conclusão da atividade i ;
- s e t : atividades fictícias que representam, respectivamente, o início e o fim do projeto;
- r_{ik} : quantidade do recurso k que a atividade i necessita para ser executada;
- p_i : tempo de processamento da atividade i ;
- M e N : constantes arbitrárias suficientemente grandes;
- f_{ijk} : fluxo do recurso k da atividade i para a atividade j ;
- x_{ij} : variável binária que estabelece se a atividade i precede j ;
- S_i : data de início da atividade i .

Dessa forma, escreve-se o modelo conforme apresentado em Artigues et al. (2003):

$$\min C_{max} \tag{8}$$

$$s. a. \quad x_{ij} = 1 \quad \forall (i, j) \in E \quad (9)$$

$$S_j - S_i - Mx_{ij} \geq p_i - M \quad \forall i \in V \cup \{s\}, \forall j \in V \cup \{t\} \quad (10)$$

$$f_{ijk} - Nx_{ij} \leq 0 \quad \forall i \in V \cup \{s\}, \forall j \in V \cup \{t\}, \forall k \in R \quad (11)$$

$$\sum_{j \in V \cup \{t\}} f_{ijk} = r_{ik} \quad \forall i \in V \cup \{s\}, \forall k \in R \quad (12)$$

$$\sum_{i \in V \cup \{s\}} f_{ijk} = r_{jk} \quad \forall j \in V \cup \{t\}, \forall k \in R \quad (13)$$

$$C_{max} \geq S_i + p_i \quad \forall i \in V \quad (14)$$

$$f_{ijk} \in \mathbb{N} \quad \forall i \in V \cup \{s\}, \forall j \in V \cup \{t\}, \forall k \in R \quad (15)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V \cup \{s\}, \forall j \in V \cup \{t\} \quad (16)$$

A função objetivo em (8) minimiza o tempo total de execução do projeto. As restrições (9) asseguram as relações de precedência estabelecidas *a priori*. As restrições (10) representam as relações de sequenciamento entre as atividades. O conjunto de restrições em (11) definem a possibilidade de fluxo de um tipo de recurso entre duas atividades. As restrições (12) e (13) representam a conservação da quantidade de recursos que entra e sai de cada atividade. Em (14) define-se o tempo total de execução do projeto. Por fim, (15) e (16) representam os respectivos domínios das variáveis de decisão f_{ijk} e x_{ij} .

Escrito dessa forma, há que se considerar que a formulação básica do PSRR proposta em Artigues et al. (2003) está originalmente relacionada à atividades de projetos. Entretanto, mais adiante, serão apresentadas algumas considerações importantes que permitem a aplicação de uma versão aprimorada do PSRR ao PSMRR.

2.6 O Problema de Sequenciamento de Manutenção com Restrição de Recursos (PSMRR)

Neste caso particular do PSM, considera-se que os recursos, como a mão-de-obra, por exemplo, estão disponíveis em quantidades limitadas no curto prazo.

Robert & Escuderos (1983) formularam um modelo para o PSMRR com o objetivo de maximizar a utilização da mão-de-obra, com diferentes prioridades para as tarefas de manutenção e assumindo que um indivíduo da força de trabalho tem múltiplas habilidades.

Yao et al. (2001) apresentam um modelo hierárquico em dois níveis que otimiza o PSM em uma fábrica de semicondutores. Por meio do desenvolvimento de um processo de decisão de Markov, os autores propuseram um modelo de programação inteira mista que maximiza o lucro proveniente de *clusters* de produção. Além disso, consideram a existência de janelas de tempo entre as atividades de manutenção preventiva e a restrição de recursos como funções não lineares.

Djisktra et al. (1994) descrevem um sistema de suporte à decisão baseado em dois modelos de programação inteira para o PSMRR em uma companhia aérea. O primeiro modelo utiliza estimativas acerca da carga de trabalho, duração de turnos, número de habilidades por turno e o nível de serviço desejado como entradas. O modelo então realiza os cálculos para o tamanho e a composição dos turnos tal que o número de trabalhadores seja minimizado, a restrição do nível de serviço seja satisfeita e as tarefas estejam de acordo com as habilidades disponíveis no turno. O segundo modelo, por sua vez, garante uma dada força de trabalho que otimize a carga de trabalho ao mesmo tempo em que maximiza o nível de serviço.

Ahire et al. (2000) examinam a utilidade de estratégias evolucionárias na resolução do PSMRR considerando restrições de mão-de-obra. O objetivo, neste caso, é minimizar o *makespan*, considerando trabalhadores com múltiplas habilidades. Os autores simplificam o problema ao assumirem que se um trabalhador é usado em determinada tarefa, ele trabalha nesta desde o seu início.

Alardhi et al. (2007) apresentam um modelo binário de programação linear inteira com o intuito de encontrar o melhor sequenciamento da manutenção em centrais de cogeração de energia, considerando-as de forma dependente e independente. A função objetivo maximiza a disponibilidade de energia e dos equipamentos de dessalinização. Os autores levam em conta as janelas de tempo entre as manutenções, a duração das tarefas, a lógica operacional, restrições de recursos, disponibilidade da equipe de manutenção, medidas de eficiência e demanda como o conjunto de restrições.

Não obstante às importantes contribuições dos diversos autores acerca do tema, uma atenção particular é dada ao trabalho de Safaei et al. (2011). Os autores desenvolveram um modelo de programação linear inteira mista para o PSMRR em que há restrição em relação à força de trabalho. As tarefas de manutenção devem ser sequenciadas durante um

horizonte de planejamento determinado, considerando-se dois objetivos: minimização da força de trabalho requerida e maximização da disponibilidade dos ativos. A força de trabalho é definida como o número de trabalhadores com habilidades (ou especialidades) específicas necessárias à execução das tarefas, dado um horizonte de planejamento. A disponibilidade, por sua vez, é a porcentagem de tempo dentro do mesmo horizonte no qual os equipamentos estão operando ou parados, desde que disponíveis à operação.

Os autores investigaram duas abordagens distintas. A primeira é baseada nos tipos de especialidades existentes, e depende de um escalonamento das mesmas ao longo dos períodos do horizonte de planejamento e das tarefas a serem realizadas. Safaei et al. (2011) argumentam que dessa forma o modelo torna-se muito complexo computacionalmente, e propõem uma segunda abordagem baseada em fluxo em redes.

Nesta segunda alternativa, a complexidade computacional é amenizada usando uma formulação de fluxo em redes na qual a força de trabalho é considerada como fluxo, e as tarefas são os nós da rede. Os trabalhadores são alocados às tarefas a partir de um nó artificial inicial, que representa a início das atividades, e perpassam pela rede até um nó artificial final, significando o término das atividades. Não obstante a forma como os trabalhadores serão alocados às tarefas, *inputs* de trabalhadores são iguais aos *outputs* dos mesmos. Neste caso, o número de trabalhadores necessários para realizar todas as tarefas é representado pelo fluxo de entrada (ou saída). Esta estratégia torna a modelagem independente do tempo e reduz significativamente a complexidade computacional (SAFAEI et al., 2011).

Safaei et al. (2011) dispõem de alguns pressupostos básicos em sua abordagem:

1. O tamanho do horizonte de planejamento é conhecido (p.e., dia), dividido em unidades de tempo (p.e., horas);
2. Outros recursos limitados tais como ferramentas, espaço físico, peças de reposição etc. estão disponíveis no momento da falha;
3. Cada tarefa de manutenção representa uma OM preventiva, corretiva ou preditiva;
4. Preempção não é permitida;
5. Cada especialidade está relacionada à certa competência, e cada trabalhador pode ter mais de uma habilidade. Entretanto, cada trabalhador será designado a apenas uma especialidade ao longo do horizonte;
6. O total de habilidades requeridas para a realização dos trabalhos é menor ou igual à disponibilidade de habilidades da força de trabalho.

7. O número de pessoas disponíveis em cada especialidade é conhecido no momento do sequenciamento. Além disso, o salário da força de trabalho é pago considerando-se todo o horizonte independente do tempo trabalhado.
8. A força de trabalho requerida e os tempos de processamento de cada tarefa, para todas as especialidades, são estimados com base em dados históricos;
9. Uma penalidade é associada a cada tarefa, a qual mede sua prioridade. Esta penalidade é mensurada em termos do tempo de parada ocasionado pela falha associada a não realização da respectiva OM.

Ademais, Safaei et al. (2011) considera como fator de priorização/ penalidade as datas em que as tarefas foram submetidas à programação. Relações de precedências entre as especialidades exigidas em uma mesma tarefa também são fatores determinantes na formulação proposta por esses autores. O modelo de Safaei et al. (2011) é apresentado na sequência.

Dados do modelo

- T : horizonte de planejamento em função de uma unidade de tempo t , onde $t = 1, 2, \dots, T$;
- M : número de tarefas de manutenção (preventivas, corretivas e preditivas) a serem executadas, onde $m = 1, 2, \dots, M$;
- K : número de especialidades, onde $k = 1, 2, \dots, K$.
- r_m : data de submissão da tarefa m ;
- d_m : data de vencimento da tarefa m ;
- pt_{km} : tempo de processamento requerido para a especialidade k executar a tarefa m ;
- W_{mk} : número de trabalhadores da especialidade k para realizar a tarefa m ;
- p_{mkl} : tem valor 1 se a especialidade k vem imediatamente antes da especialidade l (relações de precedência) na tarefa m ; tem valor zero caso contrário;
- w_m : penalidade da tarefa m ;
- M^+ : constante positiva suficientemente grande;
- ε : constante que representa o mínimo entre as datas de início e término das tarefas, considerando-se todos os recursos.

Variáveis de decisão

- x_{mn}^k : número de trabalhadores da especialidade k que devem migrar para tarefa n depois de finalizarem a tarefa m ;
- y_{mn}^k : variável binária, e tem valor 1 se for possível enviar trabalhadores da especialidade k da tarefa m para a tarefa n ; será zero caso contrário;
- e_{mk} : número de trabalhadores enviados diretamente do centro de manutenção para executar a tarefa m , ou seja, não passaram por nenhuma tarefa anterior;
- s_{mk} : número de trabalhadores da especialidade k que retornam para o centro de manutenção vindos da tarefa m ;
- st_{mk} : data de início da tarefa m pela especialidade k ;
- ct_{mk} : data de término da tarefa m pela especialidade k ;
- φ_m : data de término da tarefa m ;
- λ_k : número de manutentores da especialidade k necessários ao longo do horizonte de planeamento;

Modelo

$$\text{Minimizar } Z_1 = \sum_{m=1}^M w_m(\varphi_m - r_m) \quad (17)$$

$$\text{Minimizar } Z_2 = \sum_{k=1}^K \lambda_k \quad (18)$$

$$\text{Sujeito a: } \begin{cases} y_{mn}^k \leq 1 + \left(\frac{st_{nk} - ct_{mk}}{M^+} \right) \\ y_{mn}^k \geq \varepsilon + \left(\frac{st_{nk} - ct_{mk}}{M^+} \right) \end{cases} \quad \forall k, m, n; \quad pt_{nk} > 0, pt_{nk} > 0, m \neq n \quad (19)$$

$$x_{mn}^k \leq y_{mn}^k * M^+ \quad \forall k, m, n; \quad pt_{nk} > 0, pt_{nk} > 0, m \neq n \quad (20)$$

$$\sum_{\substack{m=1 \\ n \neq m}}^M x_{mn}^k + e_{nk} = W_{mk} \quad \forall k, n; \quad pt_{nk} > 0 \quad (21)$$

$$\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^M x_{mn}^k + s_{mk} = W_{mk} \quad \forall k, m; \quad pt_{mk} > 0 \quad (22)$$

$$ct_{mk} = st_{mk} + pt_{mk} \quad \forall k, m; pt_{mk} > 0 \quad (23)$$

$$\varphi_m \geq ct_{mk} \quad \forall k, m \quad (24)$$

$$\varphi_m \leq d_m \quad \forall m \quad (25)$$

$$ct_{mk} - st_{ml} \leq 0 \quad \begin{array}{l} \forall k, l, m; \\ p_{mkl} = 1, pt_{mk} > 0, pt_{ml} > 0 \end{array} \quad (26)$$

$$\lambda_k \geq \sum_{m=1}^M s_{mk} \quad \forall k \quad (27)$$

$$\begin{array}{l} y_{mn}^k \in \{0,1\}; st_{mk}, ct_{mk}, \varphi_m, \lambda_k \geq 0; \\ x_{mn}^k, e_{mk}, s_{mk} \in \mathbb{Z}^+ \end{array} \quad (28)$$

A função objetivo em (17) minimiza a penalidade total do *makespan* das atividades. A função objetivo em (18), por sua vez, minimiza a quantidade de mão-de-obra requerida. As restrições em (19) indicam que o fluxo da força de trabalho entre as tarefas m e n é possível, isto é, $y_{mn}^k = 1$, se e somente se m é finalizada antes de n . O conjunto de restrições em (20) condicionam o envio de fluxo de algum tipo de especialidade à tarefa n à relação de precedência entre m e n . As restrições (21) e (22) determinam o equilíbrio do fluxo de mão-de-obra entre as tarefas, garantindo que as quantidades requeridas serão respeitadas. As restrições (23) determinam a data de início de cada tarefa por uma determinada especialidade. Em (24), determina-se a data de término das atividades. A desigualdade em (25) impõe que a data de término de cada tarefa não pode ultrapassar sua respectiva data de vencimento. O conjunto de restrições em (26) garante a satisfação das relações de precedência. As restrições (27) determinam o número de trabalhadores utilizados como uma saída do modelo. Por fim, em (28) tem-se o domínio das variáveis de decisão.

A modelagem apresentada neste trabalho possui alguns pontos em comum com a abordagem encontrada em Safaei et al. (2011), e será descrita no Capítulo 4.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

3.1 Classificação da pesquisa

Quanto à sua finalidade, este trabalho é classificado como pesquisa aplicada, uma vez que contribui para fins práticos por meio da busca de soluções a um problema concreto (MORABITO & PUREZA, 2010). Em particular, pode-se classificá-lo como pesquisa empírica normativa, pois objetiva desenvolver políticas, estratégias e ações que melhorem a situação corrente, baseando-se em modelos que prescrevem uma decisão para o problema (MORABITO & PUREZA, 2010).

Quanto à natureza, esta monografia constitui-se como um resumo de assunto, pois se baseia em trabalhos e publicações de outros autores e não se presta apenas à simples cópia de ideias (ANDRADE, 2003).

Quanto à abordagem, o trabalho possui caráter quantitativo. Preocupa-se com a mensurabilidade e a causalidade entre variáveis, bem como a generalização e a replicação dos resultados obtidos e das análises realizadas.

Quanto à metodologia da pesquisa, emprega-se a modelagem quantitativa. Modelos quantitativos são construções abstratas descritas em linguagem matemática e computacional. A elaboração de um modelo possibilita compreender as características essenciais do ambiente estudado. Por outro lado, a representação do sistema real pelo modelo deve ser suficientemente simplificada a fim de ser tratável por métodos analíticos de resolução (MORABITO & PUREZA, 2010).

3.2 Delimitação e descrição do universo abordado

A pesquisa empírica normativa desenvolvida neste trabalho visa aplicar um modelo de Programação Linear Inteira Mista ao Problema de Sequenciamento de Manutenção com Restrição de Recursos. Para tanto, considerou-se a dinâmica de funcionamento do

Planejamento e Controle da Manutenção conforme será descrita a seguir. Tal descrição do PCM é baseada na rotina diária de uma empresa multinacional do setor de mineração.

O sequenciamento das Ordens de Manutenção (OMs) envolve uma sequência coerente de ações conjuntas entre as etapas de inspeção, planejamento, provisionamento, programação e realização efetiva das tarefas. Tais funções são coordenadas pelo setor de Planejamento e Controle de Manutenção das empresas, que objetivam garantir o fluxo de cada atividade, bem como consolidá-las em indicadores que permitam a sua gestão.

A origem das OMs inicia-se a partir de uma demanda ou necessidade imediata de correção identificada pelo inspetor da área industrial. Cada inspetor possui a priori uma rota pré-determinada na qual são verificadas as condições dos equipamentos que constituem o seu plano de inspeção.

Esta modalidade de verificação das condições operacionais de um equipamento é também denominada inspeção sensitiva, onde se verificam parâmetros como temperatura e vibração. Além disso, análises mais detalhadas dessas características têm sido obtidas por métodos de inspeção fina como raios-X e ensaios de líquidos penetrantes, consolidando dessa forma a prática da Manutenção Preditiva, mencionada no Capítulo 2.

Em seguida, toda a demanda por serviços de manutenção é encaminhada ao planejamento, setor responsável pela avaliação crítica das ordens recebidas. O planejador é encarregado das seguintes tarefas: verificar o detalhamento da ordem a ser executada, identificar se há necessidade de material extra, verificar se existe um plano de trabalho (sequência de passos para a execução da tarefa) prévio para o serviço, padronizar o serviço caso não exista o plano de trabalho específico, encaminhar a ordem de serviço para a programação ou para o provisionamento.

As ordens que seguem para a programação estão conformes do ponto de vista dos métodos de execução e da necessidade de recursos extras tais como máquinas, ferramentas e peças sobressalentes. Dessa forma, a função do programador consiste em programar os serviços, ou seja, inserir na rotina diária e/ou mensal da manutenção as novas demandas identificadas. Além disso, é função da programação elencar quais serão os executantes de cada atividade, bem como se o quantitativo de mão-de-obra disponível é suficiente para a execução de todas as tarefas em tempo hábil. Caso não seja, o programador, juntamente com o inspetor ou mesmo seu supervisor imediato, decide quais serão as prioridades de execução. Por fim, a aprovação final do quadro funcional de execução e do sequenciamento das OMs fica a cargo do supervisor de manutenção.

Por outro lado, as ordens que seguem para o aprovisionamento carecem de materiais extras ou sobressalentes inexistentes no estoque da manutenção e necessários ao pleno desenvolvimento da tarefa. O aprovisionador responsabiliza-se por requisitar externa ou internamente à empresa os materiais faltantes, bem como disponibilizá-los em área nos prazos acordados previamente em função das necessidades de produção e das condições operacionais apontadas pela inspeção. Assim que o material estiver disponível, a ordem de serviço é encaminhada ao programador que, por seu turno, realiza o sequenciamento das OM's de acordo com a criticidade e a relevância das demandas apontadas pelo inspetor. O fluxograma apresentado na Figura 3.1 resume o processo abrangido pelo PCM.

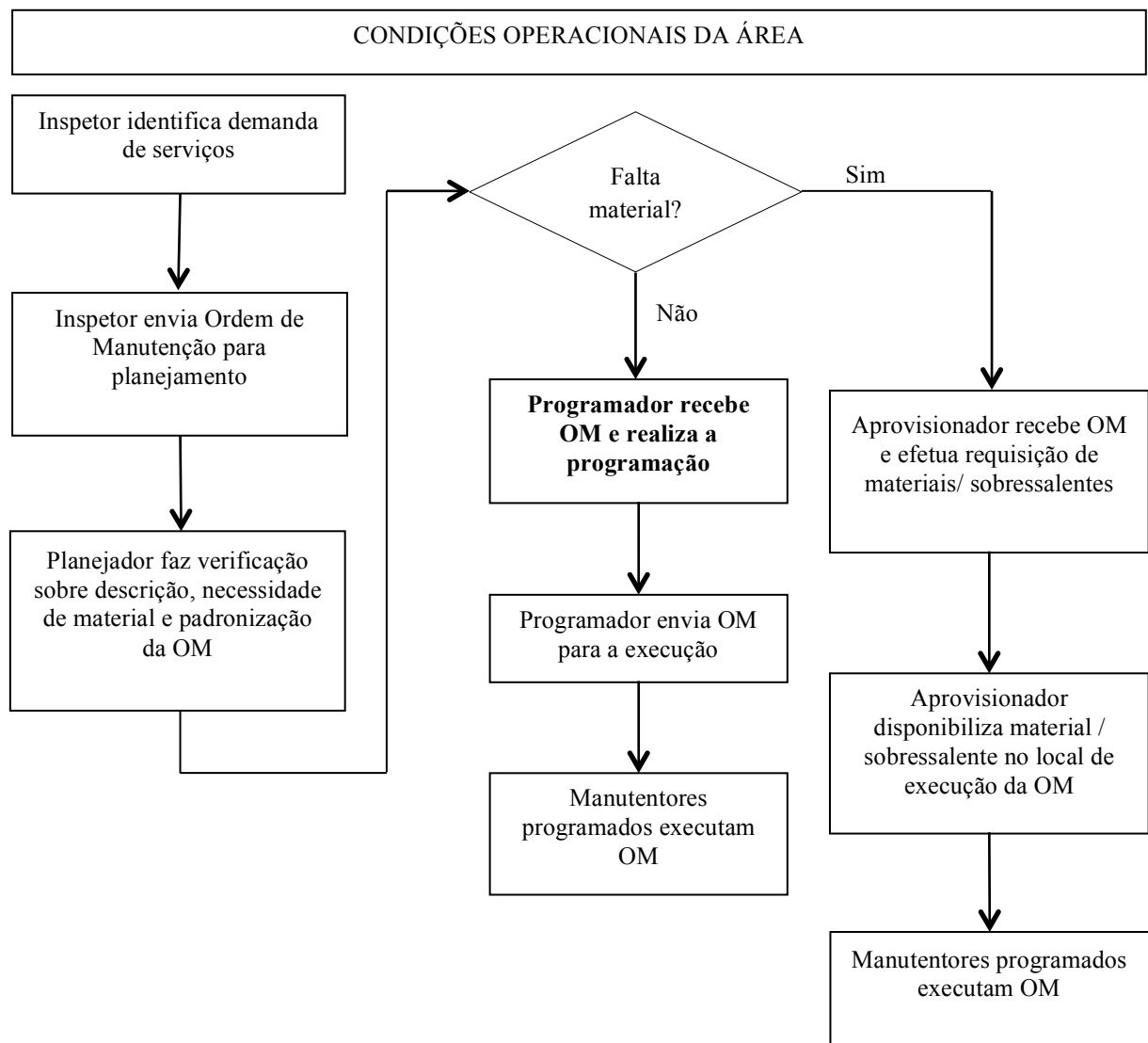


Figura 3.1 – Fluxograma resumido do Planejamento e Controle de Manutenção.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

É válido ressaltar que quando o serviço a ser realizado é de caráter corretivo, o fluxo descrito anteriormente pode não ser seguido em sua totalidade, o que é classificado

como um desvio de programação, devendo ser considerado como variabilidade ou ineficácia do planejamento.

Conforme a descrição apresentada, a programação baseia-se em diversos fatores tais como inspeção, existência de recursos etc., e afeta sobremaneira a disponibilidade da planta para a produção.

Dessa forma, o sequenciamento das OMs é uma atividade corriqueira e complexa. Caso seja realizada manualmente, torna-se bastante susceptível a erros e ineficiências, e pode não levar em consideração todos os requisitos necessários.

Em sistemas de produção complexos e de larga escala, por exemplo, a demanda por serviços de manutenção é igualmente dinâmica e complexa e exige grandes montantes de mão-de-obra de manutenção disponível. Entretanto, uma política de manutenção com quantitativo exacerbado em manutentores gera altos custos para a produção. Por outro lado, quadro reduzido de pessoal pode comprometer o objetivo de aumentar a disponibilidade operacional pela diminuição do tempo total de execução das OMs. Neste caso, um sequenciamento sistematizado das OMs, além de aumentar a disponibilidade total da planta, também contribui para a racionalização dos custos com a mão-de-obra da manutenção.

3.3 Dados utilizados nas aplicações do modelo

Os dados utilizados nas aplicações apresentadas são fictícios. Entretanto, há que se considerar certa similaridade aos valores reais, haja vista uma pequena experiência prévia no setor de manutenção industrial do autor. Os exemplos apresentados cobrem algumas ocorrências plenamente possíveis na rotina de manutenção, como a carência de mão-de-obra, as prioridades de execução e as relações de disjunção e precedência entre as OMs.

3.4 Software e ferramentas utilizadas para modelagem matemática e aplicação do modelo

Para a modelagem computacional do problema utilizou-se o *software open source GUSEK (GLPK Under Scite Extended Kit)*, versão 0.2. Esta interface de fácil utilização tem como otimizador o *GLPK (GNU Language Program Kit)*, pacote livre de otimização apropriado para problemas lineares de grande porte com muitas variáveis.

O computador empregado na implementação e execução do modelo possui a seguinte configuração: sistema operacional *Windows 7 Ultimate* (64 bits), processador Intel[®] Core[™] 2 Duo 2.10 GHz, memória RAM instalada de 4GB.

O modelo apresentado foi executado em oito exemplos distintos, considerando-se: variações nos parâmetros relativos ao número de OMs, seus respectivos tempos de execução; a presença ou ausência de relações de precedência e disjunções entre OMs; quantidade e tipos de recursos disponíveis.

CAPÍTULO 4 – MODELAGEM MATEMÁTICA PROPOSTA

4.1 Introdução

Este capítulo discorre acerca da formulação matemática proposta para a resolução do PSMRR. Inicialmente, apresentam-se alguns pressupostos com a finalidade de adequar a formulação ao Problema de Sequenciamento de Manutenção com Restrição de Recursos (PSMRR). Na sequência, apresenta-se o modelo proposto ao PSMRR. Por fim, segue uma discussão sobre a modelagem.

4.2 Considerações sobre a aplicação do modelo de PSRR ao PSMRR

Assim como em Safaei et al. (2011), alguns pressupostos são apresentados à abordagem proposta:

1. O número de tarefas para o próximo período (dia, semana, mês etc.) é conhecido, baseado em um mapeamento prévio das necessidades de manutenção dos equipamentos;
2. Outros recursos limitados tais como ferramentas, espaço físico, peças de reposição etc. estarão disponíveis conforme o planejamento realizado no setor de Planejamento e Controle de Manutenção;
3. Cada tarefa de manutenção representa uma OM preventiva ou preditiva;
4. Preempção não é permitida;
5. Cada trabalhador é especialista em apenas um cargo, ou seja, um mecânico não exerce função de eletricitista, por exemplo;
6. Existe um número limitado e previamente conhecido de manutentores para cada habilidade (mecânica, elétrica etc.), tal que com a quantidade disponível de manutentores de cada tipo não seja possível executar todas as OMs ao mesmo tempo. Além disso, manutentores com habilidades diferentes podem ou não trabalharem simultaneamente na mesma OM;

7. Os recursos (pessoal de manutenção) alocados a uma OM estarão indisponíveis por todo o tempo de execução da mesma;
8. Os tempos de execução das OMs são fixos e baseados em estimativas históricas;
9. As OMs possuem relações de disjunção e precedência conhecidas. Por relações de disjunção entende-se ser um par de OMs que não possuem uma sequência de execução predeterminada, mas que o início de uma implica a execução da outra em sequência.

A subseção seguinte apresenta a formulação proposta ao PSMRR. Em seguida, são discutidas as modificações realizadas a partir da formulação básica, a fim de melhorar o desempenho do modelo e a adequá-lo às condições supracitadas.

4.3 Parâmetros e variáveis do modelo

Os parâmetros apresentados nesta seção são basicamente os mesmos que aqueles apresentados na seção 2.5. Entretanto, acrescentou-se um conjunto D , das relações disjuntivas, inexistente na formulação mencionada. Além disso, substituíram-se os valores de M e N , constantes positivas suficientemente grandes, por um valor menos arbitrário, e que serão esclarecidos em seguida.

Parâmetros do modelo

- $\mathcal{R}$: Conjunto de r recursos k ;
- V : Conjunto de n OMs i ;
- E : Conjunto dos pares de OMs (i,j) cuja relação de precedência é conhecida;
- D : Conjunto dos pares de OMs (i,j) disjuntivas, ou seja, que não possuem uma ordem específica de execução.
- s : nó artificial que representa o início da rede;
- t : nó artificial que representa o final da rede;
- r_k : quantidade disponível do recurso k ;
- q_{ik} : quantidade de recurso k requerida na OM i ;
- p_i : tempo de execução da OM i ;

Variáveis de decisão

- S_i : data de início da atividade i ;
- f_{ijk} : quantidade do recurso r enviada de i para j ;
- $y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a atividade } i \text{ precede a atividade } j \\ 0, & \text{c.c.} \end{cases}$

4.4 Modelo proposto

O modelo proposto aproxima-se da abordagem descrita na seção 2.6, empregada por Safaei et al. (2011) ao PSMRR. Ao mesmo tempo, baseia-se na formulação de Artigues et al. (2003) apresentada na seção 2.5. Entretanto, difere quanto aos aspectos considerados e às restrições, respectivamente.

A modelagem empregada neste trabalho foi desenvolvida em conjunto com outros autores, baseada no trabalho de Vieira et al. (2010) e em discussões acerca das suas possíveis aplicações e desdobramentos, sobretudo no sequenciamento de projetos. No trabalho de Vieira et al (2011) encontra-se uma descrição detalhada e alguns exemplos de aplicação desta formulação no contexto supracitado. Dessa forma, o emprego deste modelo na manutenção industrial amplia a sua abrangência, evidenciando a sua importância.

O modelo é descrito abaixo. Na sequência, destacam-se algumas observações acerca da formulação.

Modelo matemático

$$\min C_{max} \tag{29}$$

Sujeito a:

$$y_{ij} = 1 \quad \forall (i,j) \in E; i \neq j \tag{30}$$

$$y_{ji} = 0 \quad \forall (i, j) \in E; i \neq j \quad (31)$$

$$y_{ij} + y_{ji} \leq 1 \quad \forall (i, j) \notin E \cup D; i \neq j \quad (32)$$

$$y_{ij} + y_{ji} = 1 \quad \forall (i, j) \in D; i \neq j \quad (33)$$

$$f_{ijk} - y_{ij} \max_{k \in R} \{q_{ik}\} \leq 0 \quad \forall i \in V \cup \{s\}; \forall j \in V \cup \{t\}; k \in R; i \neq j \quad (34)$$

$$\sum_{j \in V \cup \{t\}} f_{0jk} = r_k \quad \forall k \in R \quad (35)$$

$$\sum_{j \in V \cup \{t\}} f_{ijk} = q_{ik} \quad \forall i \in V; \forall k \in R; i \neq j \quad (36)$$

$$\sum_{i \in V \cup \{s\}} f_{ijk} = q_{jk} \quad \forall j \in V \cup \{t\}; \forall k \in R; i \neq j \quad (37)$$

$$\sum_{i \in V \cup \{s\}} f_{i(n+1)k} = r_k \quad \forall k \in R \quad (38)$$

$$S_j - S_i - y_{ij} \sum_{i \in V} p_i \geq - \sum_{i \in V} p_i \quad \forall i \in V \cup \{s\}; \forall j \in V \cup \{t\}; \forall k \in R; i \neq j \quad (39)$$

$$C_{max} \geq S_i + p_i \quad \forall i \in V \quad (40)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V \cup \{s\}; \forall j \in V \cup \{t\} \quad (41)$$

$$S_i \geq 0 \quad \forall i \in V \cup \{s\} \cup \{t\} \quad (42)$$

$$f_{ijk} \in \mathbb{N} \quad \forall i \in V \cup \{s\}; \forall j \in V \cup \{t\}; \forall k \in R \quad (43)$$

A função objetivo (29) é igual à apresentada em (20), e minimiza o tempo total de execução das manutenções. Os conjuntos de restrições (30) e (31) fixam os valores das variáveis em 0 ou 1, de acordo com as relações de precedência predeterminadas. Em (32), garante-se a não existência de ciclos no fluxo dos recursos. Já as restrições em (33) definem as relações de precedência entre as manutenções. É válido salientar que para o conjunto de relações disjuntivas, as restrições em (33) são particularmente necessárias, uma vez que tanto o fluxo direto quanto inverso pode ser ativado. As restrições (34) estabelecem um limite para o fluxo do recurso k entre as ordens i e j . As restrições (35) a (38) garantem o equilíbrio de fluxo dos recursos ao longo do sequenciamento, o que configura o caráter renovável dos

recursos. Em (39) gera-se o sequenciamento das ordens de manutenção, enquanto em (41), (42) e (43) delimita-se o domínio das variáveis.

4.5 Discussões sobre o modelo

Conforme mencionado anteriormente, a modelagem proposta neste trabalho é explorada em um contexto mais genérico de sequenciamento de projetos no trabalho de Vieira et al. (2011). Além disso, este modelo acrescenta alguns aspectos não considerados em Artigues et al. (2003), e que merecem serem destacados.

As restrições em (31) foram incluídas com o intuito de garantir que não haja ciclo entre duas atividades pertencentes ao conjunto de atividades precedentes. Fixando-se tais valores de x_{ij} , é possível reduzir o número de variáveis do problema em $|E|$.

As restrições (32) foram introduzidas a fim de garantir a viabilidade do problema em relação à execução dos pares de atividades que não possuem relações de precedência preestabelecidas e nem relações disjuntivas. Este conjunto de restrições é particularmente necessário para a determinação do fluxo dos recursos ao longo da execução das ordens de manutenção.

Outro ponto de destaque em relação ao modelo básico do PSRR constitui-se no conjunto de restrições (33), as quais se referem às relações disjuntivas, estabelecendo que um par (i, j) de ordens de manutenção não possam ser executadas ao mesmo tempo.

Outro aprimoramento ao modelo básico do PSRR apresentado por Artigues et al. (2003) na seção 2.5 está relacionado aos valores arbitrários de M e N nas restrições (10) e (11), respectivamente. No caso do modelo apresentado, M é calculado em função dos valores de p_i na restrição (39) e N , em função dos valores de q_{ik} no conjunto de restrições em (34).

Como o valor de M no modelo de Artigues et al. (2003) está relacionado aos tempos de processamento e deve ser um valor suficientemente grande, na formulação apresentada o M torna-se a soma de todos os tempos de processamento, garantindo que seu valor atenderá ao requisito de grandeza e deixará de ser uma constante arbitrária. Este novo valor atribuído a M assegura que, no caso de as atividades não apresentarem relação de precedência ($y_{ij} = 0$), o somatório de todos os tempos de execução será sempre maior ou igual ao tempo de processamento de apenas uma atividade, validando assim as restrições em (39).

No conjunto de restrições (34), por sua vez, substituiu-se o valor arbitrário de N , conforme formulação de Artigues et al (2003) na seção 2.5, pelo valor máximo de um determinado recurso necessário a uma atividade. Como a restrição condiciona a existência de fluxo à existência de uma relação de precedência entre as atividades i e j , a escolha por um valor máximo dentre os possíveis fluxos entre i e j sempre atenderá a restrição.

Outra evolução em relação ao modelo básico do PSRRR é dada nas restrições (30), (31), (32), (33), (36), (37) e (39), as quais se limitam a valores de $i \neq j$. De fato, essa condição reduz em n o número de variáveis do problema para cada conjunto de restrições em (36) e (37), e em n restrições para cada um dos conjuntos em (30), (31), (32), (33) e (39).

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Introdução

O PSMRR permeia praticamente todos os ambientes em que a atividade de manutenção se faz presente. Conforme já mencionado, os objetivos de se sequenciar ordens de manutenção perpassam desde a minimização de custos até a redução de tempo total de execução das intervenções. Apesar de objetivos distintos e das diversas especificidades, o PSMRR tem a sua essência na alocação ótima dos recursos de manutenção.

Este capítulo aborda a aplicação do modelo proposto na seção 4.5 ao sequenciamento de tarefas e alocação de recursos de manutenção, apresentando alguns contextos específicos dessa atividade. As seções que se seguem apresentam a definição do contexto abordado e os dados utilizados. Além disso, os resultados para as diferentes aplicações realizadas são mostrados e analisados.

5.2 Definição do problema

Considere um ambiente fabril que pratica uma política de manutenção preventiva baseada em planos de inspeção periódica. A demanda por OMs preventivas é definida pelas necessidades de intervenção identificadas pelo inspetor de equipamentos.

As OMs geradas seguirão seu fluxo convencional (vide descrição no Capítulo 3) até estarem prontas para serem programadas. A programação das OMs feita no período t são sempre referentes ao período $t + 1$, sendo que a demanda identificada pelo inspetor não necessariamente segue esta ordem. O período pode variar, podendo ser contado em turnos, dias, semanas etc.

Seja ainda a existência de um ou mais tipos de profissionais de manutenção (mecânicos, eletricitas etc.), em número limitado, os quais devem ser designados para a execução das OMs. As OMs podem necessitar de um ou mais tipo de recurso. Além disso,

uma vez na execução de uma OM, o recurso estará indisponível até o seu término efetivo, e a preempção não é permitida. Neste trabalho consideraram-se apenas OMs que necessitam de um ou dois tipos de recursos distintos.

A partir dessas informações, o modelo foi executado considerando oito configurações distintas e passíveis de ocorrência na rotina de manutenção. Dessa forma, as aplicações consideradas subdividem-se em dois grupos: o primeiro, considera uma demanda para o sequenciamento e alocação de recursos para 15 OMs; o segundo, por sua vez, admite uma situação onde sequenciamento e recursos deverão ser resolvidos para 20 OMs. A Seção 5.3 mostra a representação em rede para os grupos de 15 e 20 OMs, bem como os respectivos parâmetros utilizados para cada aplicação.

Para a apresentação dos resultados, optou-se por apresentar as saídas de forma gráfica. Com isto, espera-se facilitar a análise dos dados, uma vez que a exposição em tabelas seria custosa em relação à visualização da relação sequenciamento e recursos alocados.

5.3 Parâmetros de aplicação

As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram os respectivos parâmetros utilizados em cada uma das aplicações com 15 e 20 OMs, respectivamente. Os detalhes específicos acerca de cada exemplo serão apresentados em suas respectivas seções.

<i>n = 15</i>	<i>Exemplos 1 e 3</i>		<i>Exemplos 2 e 4</i>	
	<i>p_i</i>	<i>q_{i1}</i>	<i>q_{i1}</i>	<i>q_{i2}</i>
2	5	1	0	2
3	4	2	2	3
4	3	2	2	1
5	1	2	0	4
6	1	2	2	2
7	1	2	1	1
8	1	2	2	3
9	2	2	2	0
10	1	3	4	2
11	2	3	3	2
12	1	3	3	2
13	1	3	2	1

14	1	2	1	4
15	1	2	0	2
16	3	2	2	0

Tabela 5.1 – Dados para exemplos 1 a 4.

<i>n = 20</i>	<i>Exemplos 5 e 7 Exemplos 6 e 8</i>			
	<i>p_i</i>	<i>q_{i1}</i>	<i>q_{i1}</i>	<i>q_{i2}</i>
2	5	1	3	2
3	4	2	2	1
4	3	2	1	1
5	1	2	0	3
6	1	2	2	2
7	1	2	2	4
8	1	2	1	3
9	2	2	4	2
10	1	3	3	0
11	2	3	3	3
12	1	3	0	2
13	1	3	3	3
14	1	2	2	2
15	1	2	2	1
16	3	2	1	1
17	1	2	2	1
18	1	2	4	0
19	0,5	2	2	1
20	2	3	2	0
21	4	4	3	1

Tabela 5.2 – Dados para exemplos 5 a 8.

Além disso, para todos os exemplos apresentados, as quantidades totais dos recursos 1 e 2 são, respectivamente, 7 e 6 unidades ou manutentores disponíveis.

Cabe salientar ainda que o número de OMs, suas respectivas quantidades de recursos e seus tempos de execução são exemplos ilustrativos baseados nas distribuições e no gerenciamento de OMs preventiva de um ambiente de manutenção fabril cujo autor teve oportunidade de conhecer.

5.4 Aplicações

5.1.1 Aplicação 1 - 15 Ordens de Manutenção, 1 Recurso, Sem disjunção

Neste exemplo, considera-se um conjunto de 15 OMs com as suas relações de precedência descritas conforme a Figura 5.1. Neste grafo representativo, os nós identificados por ‘1’ e ‘17’ são atividades fictícias, acrescentadas com a finalidade de indicar o início e o término das OMs.

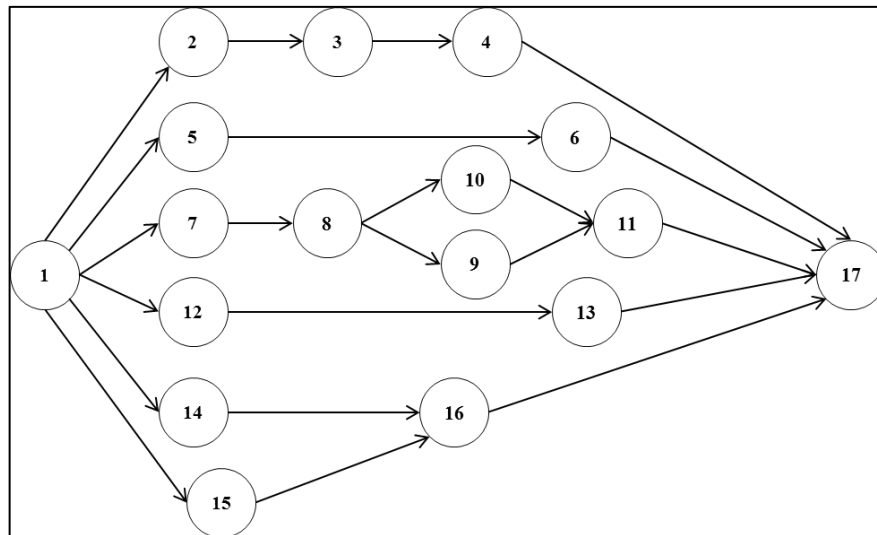


Figura 5.1 – Grafo representativo das OMs para a Aplicação 1.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

A Figura 5.3 apresenta o resultado do sequenciamento para o primeiro exemplo. Neste caso o modelo apresentou um *makespan* de 12 unidades de tempo para executar as 15 OMs, dispondo-se de 7 manutentores do tipo 1. O tempo computacional gasto foi de 14,1 segundos, com 2,4 MB de memória utilizada.

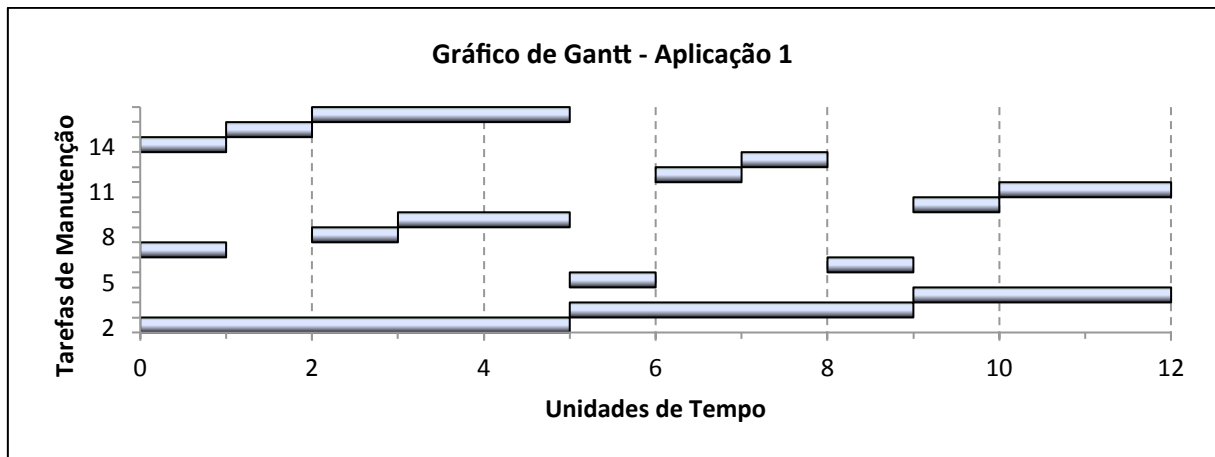


Figura 5.2 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 1.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

Ao se comparar o sequenciamento apresentado pelo modelo com o grafo representativo das OMs na Figura 5.1, percebe-se que todas as relações de precedência foram atendidas. Como dito anteriormente, a modelagem deve satisfazer tais relações de precedência, mas não obriga que uma OM precedente seja imediatamente anterior à OM sucessora. Isto pode ser notado entre os pares de OM 5 e 6. A OM 6 sucede a 5, mas antes são realizadas as OMs 11 e 12.

Por meio do Gantt da figura 5.3 é possível ainda visualizar que as OMs 2, 3 e 4 constituem um caminho crítico na manutenção. Além disso, percebe-se ainda a existência de folga, como ocorrem com o par de OMs 5 e 6.

A Figura 5.4 apresenta o fluxo dos recursos de manutenção para o exemplo. Nota-se que a restrição de conservação de fluxo é plenamente atendida, bem como as necessidades de recurso de cada OM, em comparação com a Tabela 5.1. Na figura 5.4, assim como nas figuras dos próximos exemplos, os nós destacados em amarelo representam o início e a saída dos recursos de manutenção, em que as setas indicam o sentido do fluxo dos manutentores.

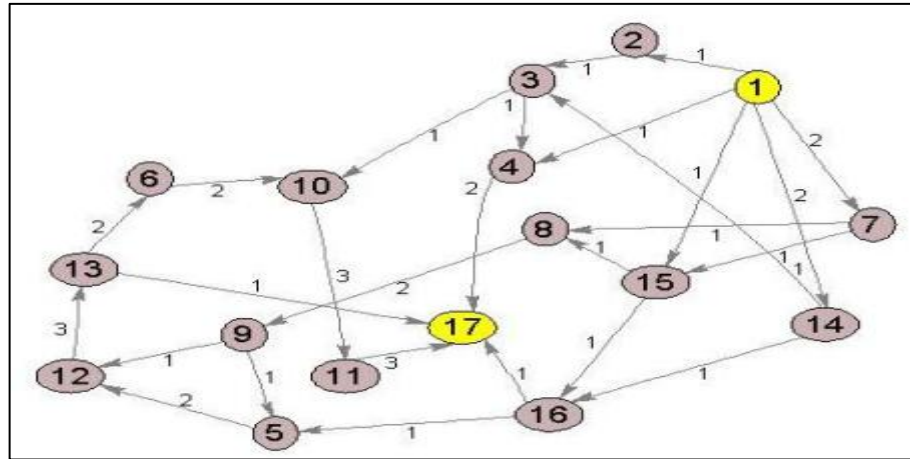


Figura 5.3 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 1 para a Aplicação 1.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

5.1.2 Aplicação 2 - 15 Ordens de Manutenção, 2 Recursos, Sem disjunção

Neste exemplo, considera-se um mesmo conjunto de 15 OMs com relações de precedência distintas da Aplicação 1 e descritas conforme a Figura 5.4. Neste grafo representativo, os nós identificados por '1' e '17' são as atividades fictícias. Relações de disjunção entre as OMs são desprezadas.

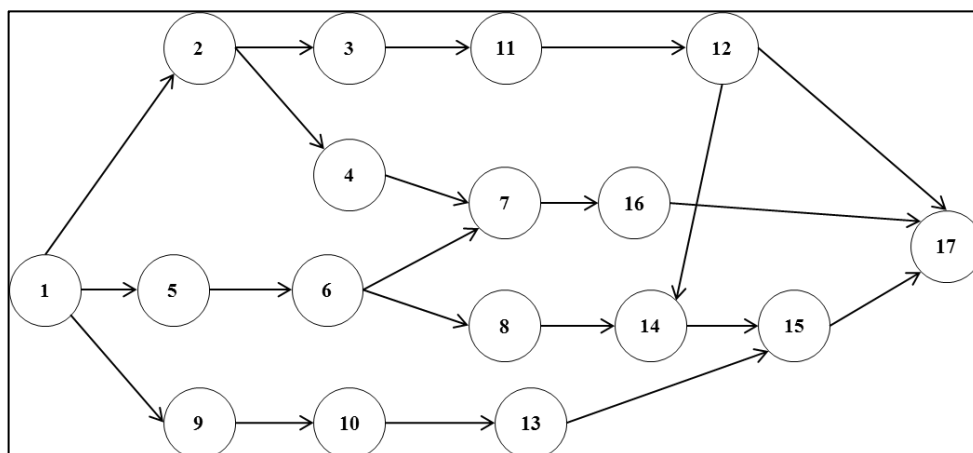


Figura 5.4 – Grafo representativo das OMs para a Aplicação 2.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

Ademais, as OM's necessitam de dois tipos diferentes de recursos renováveis de manutenção, como mecânicos e eletricitas, por exemplo. Tais quantidades são fixas e podem ser consultadas na Tabela 5.1.

A Figura 5.5 mostra o Gantt para o segundo exemplo. Considerando os 2 tipos de recursos, o modelo chegou a uma solução com *makespan* de 14 unidades de tempo para as 15 OM's, com 7 unidades do recurso 1 e 6 unidades do recurso 2. O tempo computacional gasto foi de 15,3 segundos, com 3,3 MB de memória utilizada.

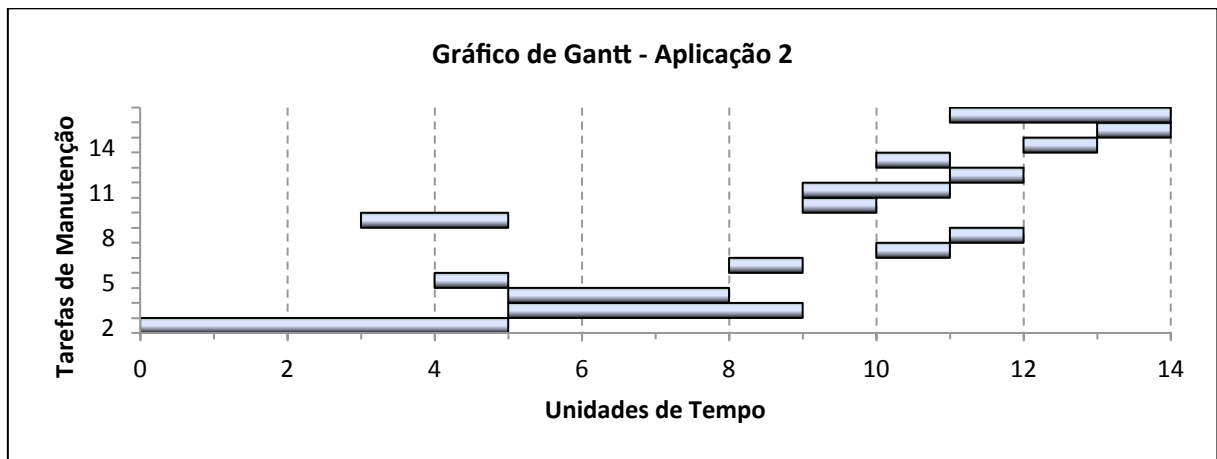


Figura 5.5 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 2.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

Ao se comparar o sequenciamento apresentado pelo modelo com o grafo representativo das OM's na Figura 5.4, percebe-se que todas as relações de precedência foram atendidas.

Com relação às OM's 2, 3, 11, 12, 14 e 15, pode-se dizer que constituem um caminho crítico, por não existem folgas entre tais OM's. Ocorre folga entre as atividades 6 e 7, por exemplo.

As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam os fluxos dos recursos do tipo 1 e 2, respectivamente. Novamente a restrição de conservação de fluxo é plenamente atendida, bem como as necessidades de recurso de cada OM, em comparação com a Tabela 5.1.

Outro aspecto a ser observado é que nas atividades que necessitam de apenas um recurso, não aparece o fluxo do outro, o que era esperado. Na figura 5.7, a OM 9 não aparece na distribuição do recurso do tipo 2, uma vez que a mesma necessita apenas de 2 unidades do recurso 1.

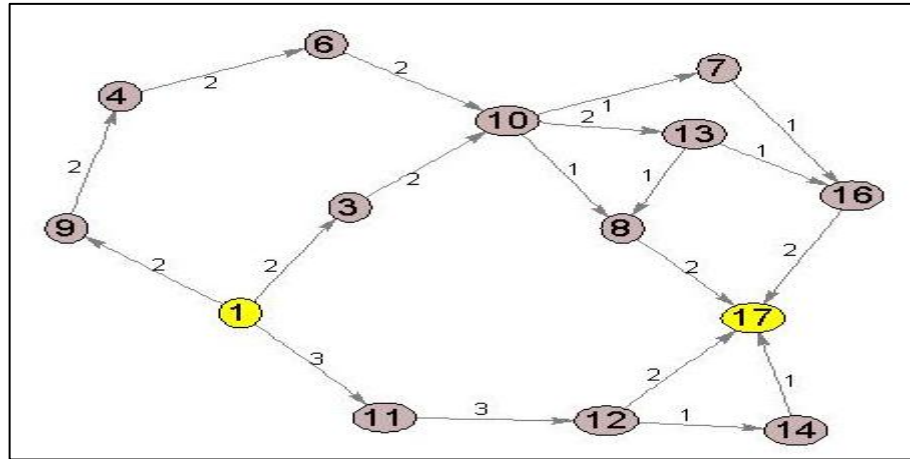


Figura 5.6 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 1 para a Aplicação 2.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

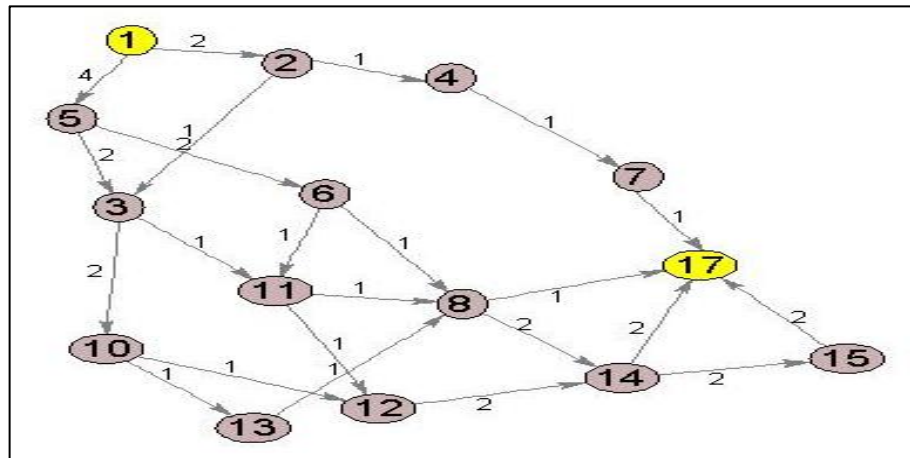


Figura 5.7 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 2 para a Aplicação 2.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

5.1.3 Aplicação 3 – 15 Ordens de Manutenção, 1 Recurso, Com disjunções

Neste exemplo, considera-se originalmente o mesmo conjunto de 15 OMs como apresentados na Figura 5.4. Entretanto, acrescentam-se algumas relações de disjunção, ou seja, pares de OMs em que a sequência de execução na importa, mas que não podem ser feitas simultaneamente. A Figura 5.8 mostra estas relações como setas pontilhadas em vermelho. Novamente, os nós ‘1’ e ‘17’ são fictícios.

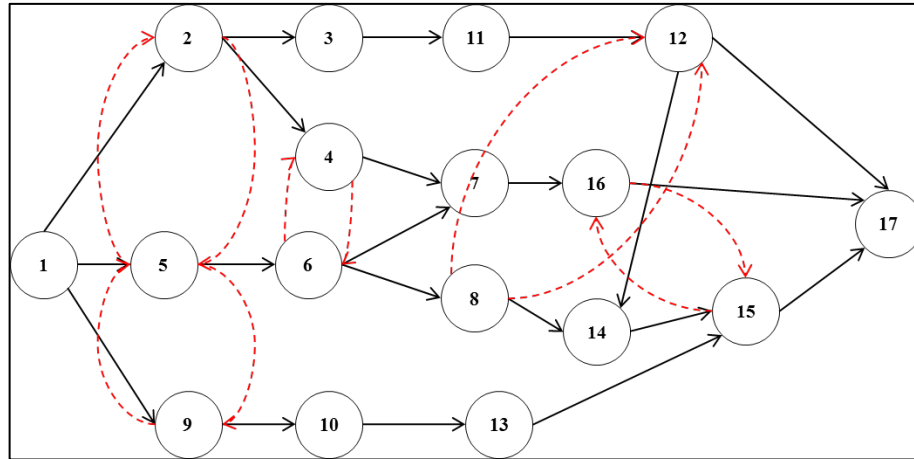


Figura 5.8 – Grafo representativo das OMs para a Aplicação 3.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

A Figura 5.9 mostra o Gantt resultante da Aplicação 3. Utilizando-se apenas as 7 unidades disponíveis do recurso 1, o modelo encontrou um *makespan* de 14 unidades de tempo. Já o tempo computacional gasto foi de 1,3 segundos, com 2,2 MB de memória utilizada.

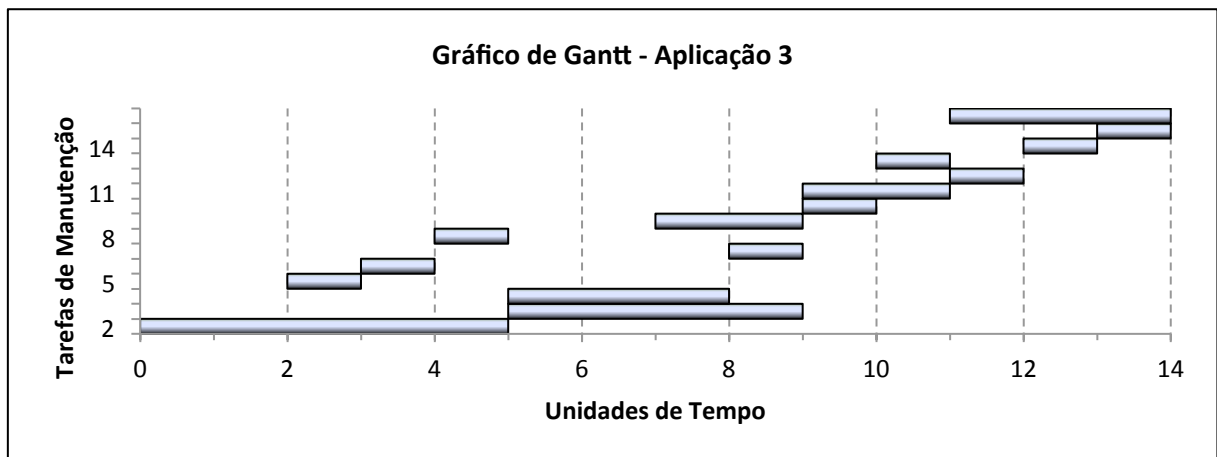


Figura 5.9 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 3.

Fonte: (Pesquisa Direta).

Ao se comparar o sequenciamento apresentado pelo modelo com o grafo representativo das OMs na Figura 5.8, nota-se que todas as relações de precedência e disjunção foram atendidas. Por exemplo, entre disjunção entre as OMs 5 e 6, o modelo decidiu executar primeiramente a OM 5. Por outro lado, na disjunção entre as OMs 4 e 6, a OM 6 teve preferência de execução.

As OMs 2, 4, 7, 10, 13 e 16 constituem um caminho crítico, por não existem folgas entre tais OMs. Ocorre folga entre as atividades 6 e 14, por exemplo.

A Figura 5.10 apresenta o fluxos do recurso tipo 1 entre as OM's do exemplo 3. Percebe-se que a restrição de conservação de fluxo é novamente atendida, bem como as necessidades de recurso de cada OM, em comparação com a Tabela 5.1. É importante observar que, apesar de existirem folgas entre as atividades, os recursos seguem uma sequência ininterrupta.

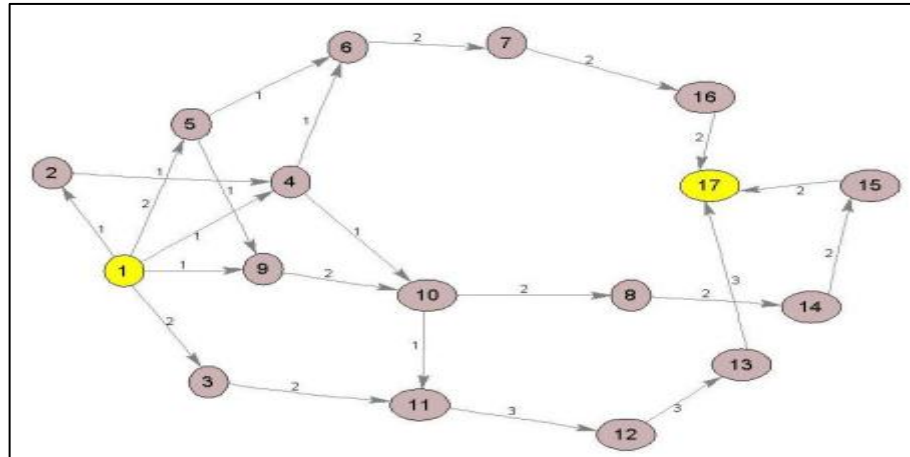


Figura 5.10 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 1 para a Aplicação 3.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

5.1.4 Aplicação 4 - 15 Ordens de Manutenção, 2 Recursos, Com Disjunções

Esta se constitui uma aplicação mais completa, pois considera diversidade de recursos e disjunções entre as OM's. As relações de precedência são as mesmas utilizadas na Aplicação 3, alterando-se apenas o número de disjunções (setas pontilhadas em vermelho), como mostra a Figura 5.11.

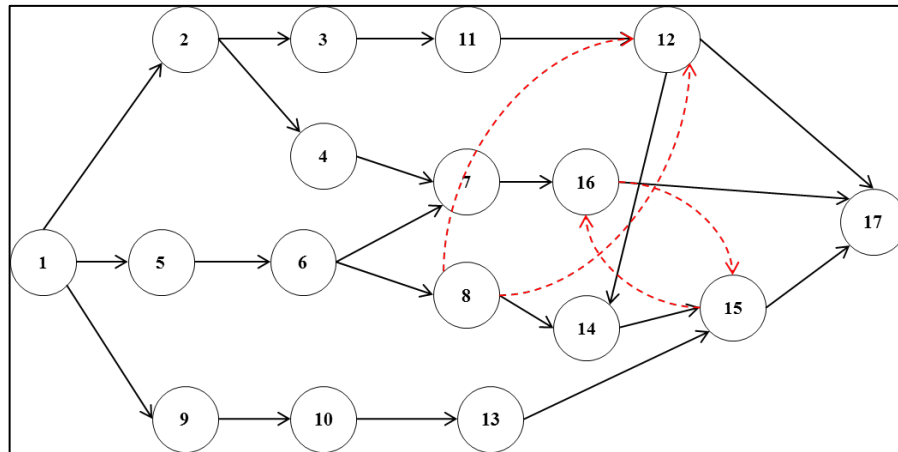


Figura 5.11 – Grafo representativo das OM's para a Aplicação 4.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

A Figura 5.12 mostra o Gantt resultante da Aplicação 4. Utilizando-se 7 unidades disponíveis do recurso 1 e 6 do recurso 2, o modelo encontrou um *makespan* de 14 unidades de tempo. Já o tempo computacional gasto foi de 10,6 segundos, com 3,3 MB de memória utilizada.

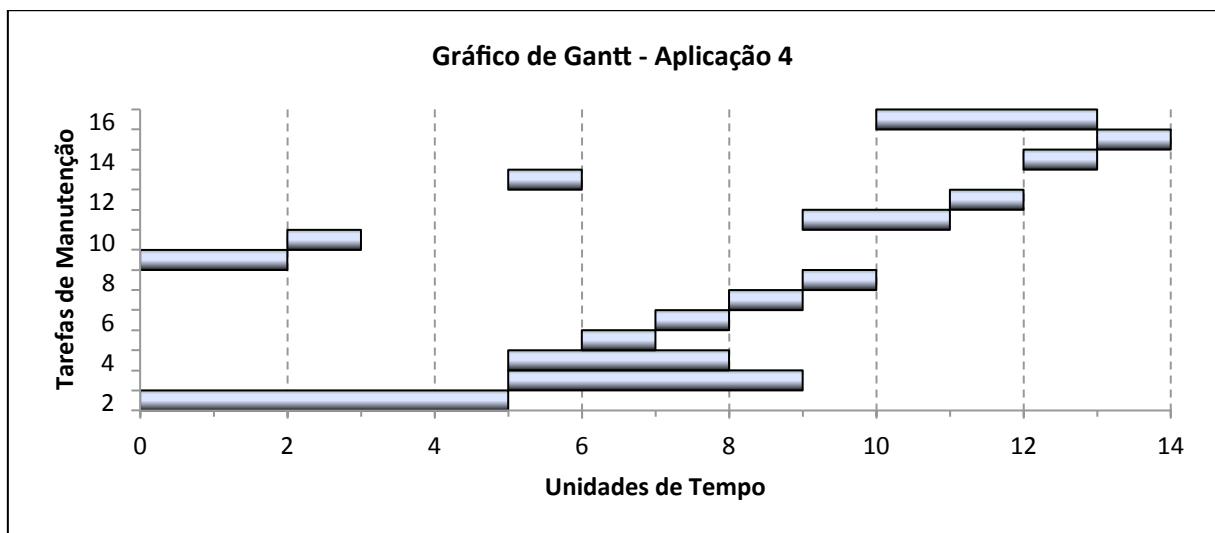


Figura 5.12 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 4.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

Todas as relações de precedência e disjunção são respeitadas comparando-se o Gantt à figura 5.11.

As OM's 2, 3, 8, 16 e 15 constituem um caminho crítico, nesta ordem, por não existirem folgas entre tais OM's. Ocorre folga entre as atividades 10 e 13, por exemplo.

As Figura 5.13 e 5.14 apresentam os fluxos do recurso tipos 1 e 2 entre as OM's do exemplo 4, respectivamente. A restrição de conservação de fluxo é novamente atendida,

bem como as necessidades de recurso de cada OM, em comparação com a Tabela 5.1. Como existem algumas OMs que necessitam de apenas um tipo de recurso, os grafos de fluxo para os dois tipos de recursos não apresentarão individualmente todas as OMs.

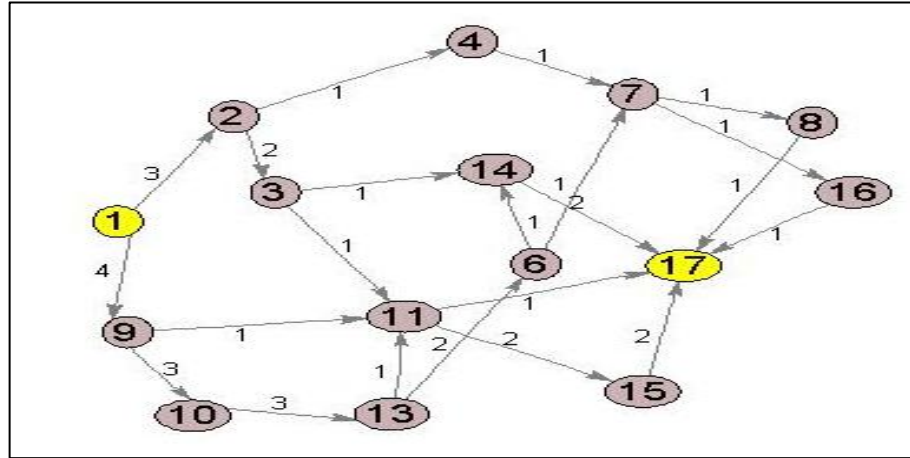


Figura 5.13 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 1 para a Aplicação 4.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

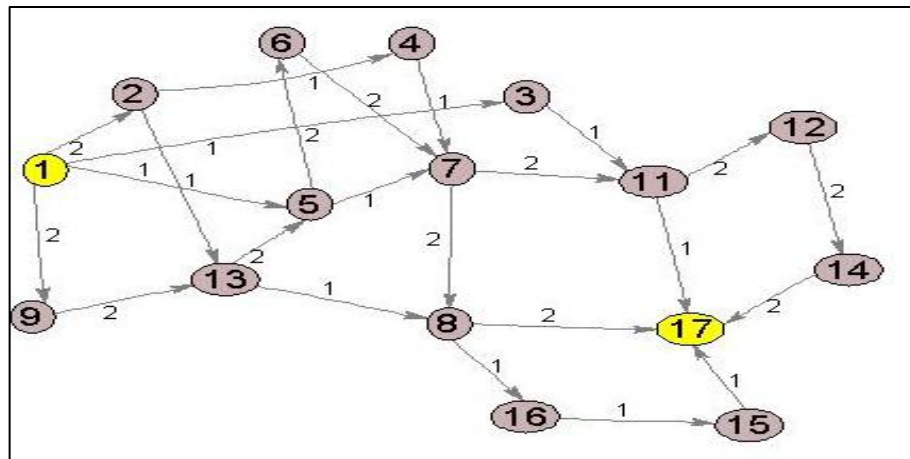


Figura 5.14 - Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 2 para a Aplicação 4.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

As próximas aplicações apresentam a mesma análise realizada até agora, porém consideram um maior número de OMs no planejamento.

5.1.5 Aplicação 5 - 20 Ordens de Manutenção, 1 Recurso, Sem Disjunção

Neste exemplo, considera-se um conjunto de 20 OMs com as suas relações de precedência descritas conforme a Figura 5.15. Neste grafo representativo, os nós identificados por ‘1’ e ‘22’ são atividades fictícias, acrescentadas com a finalidade de indicar o início e o término das OMs. Os respectivos tempo de execução das OMs estão listados na Tabela 5.2.

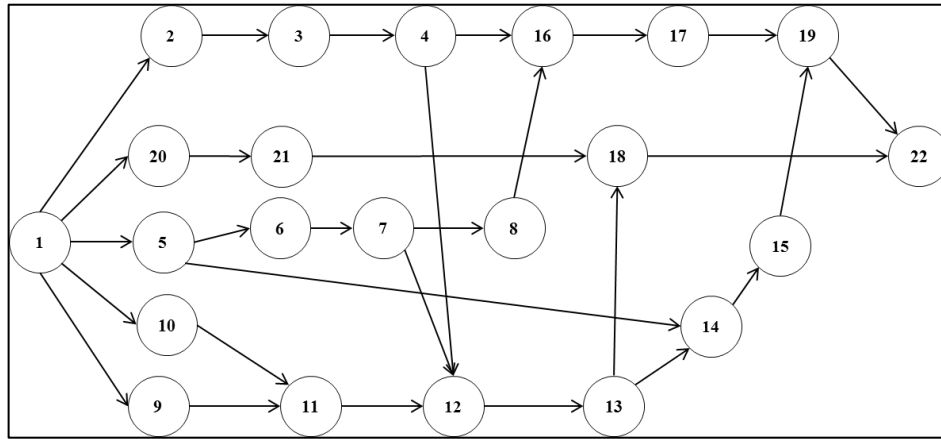


Figura 5.15 – Grafo representativo das OMs para a Aplicação 5.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

A Figura 5.16 apresenta o resultado do sequenciamento para a Aplicação 5. Neste caso o modelo apresentou um *makespan* de 16,5 unidades de tempo para executar as 20 OM, dispondo-se de 7 mantenedores do tipo 1. O tempo computacional gasto foi de 50,2 segundos, com 5,2 MB de memória utilizada.

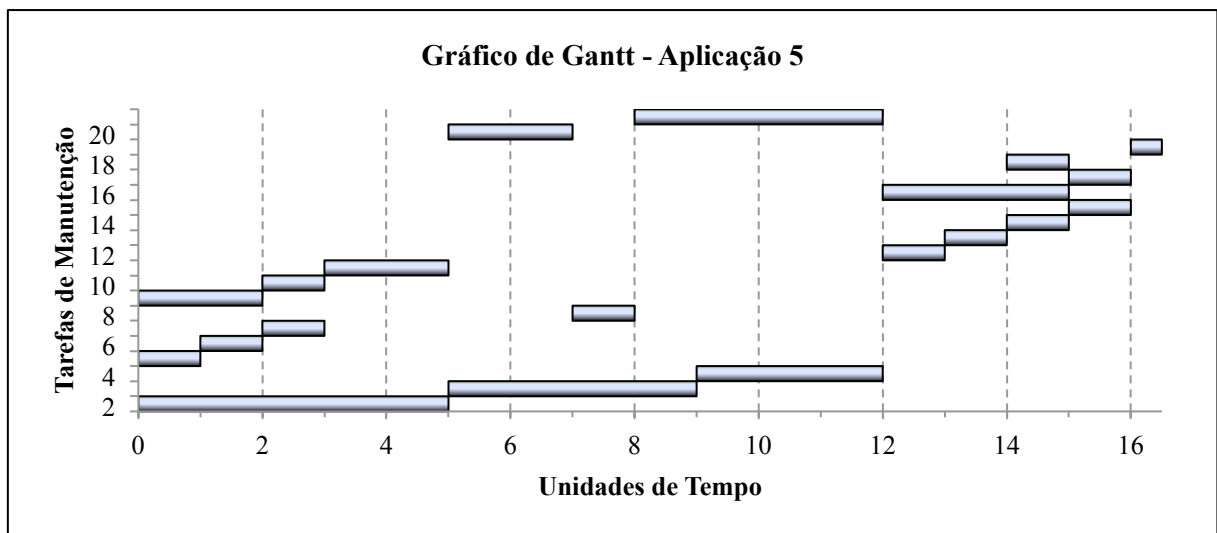


Figura 5.16 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 5.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

Ao se comparar o Gantt do sequenciamento apresentado pelo modelo com o grafo representativo das OMs na Figura 5.15, verifica-se a pertinência do modelo em atender a todas as relações de precedência.

Por meio do Gantt da figura 5.16 é possível visualizar que as OMs 9, 10, 11, 20, 8, 21, 16, 17 e 19, nesta ordem, constituem um caminho crítico no planejamento da manutenção. Entre as OMs com folga, tem-se o par 7 e 8.

A Figura 5.17 apresenta o fluxo dos recursos de manutenção para o exemplo. A restrição de conservação de fluxo dos recursos é plenamente atendida, bem como as necessidades de recurso de cada OM, em comparação com a Tabela 5.2. Da mesma forma que nas aplicações anteriores, os nós destacados em amarelo representam o início e a saída dos recursos de manutenção, onde as setas indicam o sentido do fluxo dos manutentores.

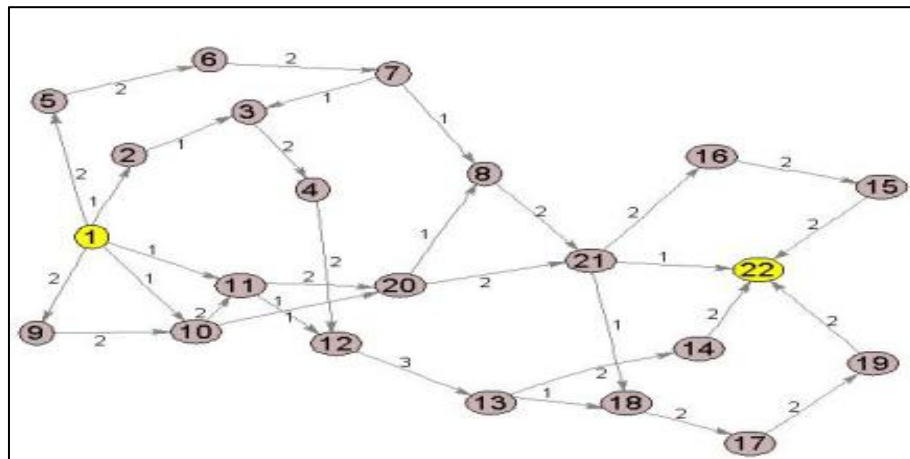


Figura 5.17 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 1 para a Aplicação 5.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

5.1.6 Aplicação 6 – 20 Ordens de Manutenção, 2 Recursos, Sem Disjunção

Neste exemplo, considera-se um mesmo conjunto de 20 OMs, considerando-se o mesmo grafo representativo para relações de precedência mostrado na Figura 5.15.

As OMs necessita de dois tipos diferentes de recursos renováveis de manutenção, cujas quantidades são fixas e podem ser consultadas na Tabela 5.2.

A Figura 5.18 mostra o Gantt para este exemplo. Considerando os 2 tipos de recursos, o modelo chegou a uma solução com *makespan* de 16,5 unidades de tempo para as 15 OMs, com 7 unidades do recurso 1 e 6 unidades do recurso 2. O valor do *makespan* neste caso é o mesmo quando se considera apenas um tipo de recurso. O tempo computacional gasto foi de 46,7 segundos, com 6,6 MB de memória utilizada.

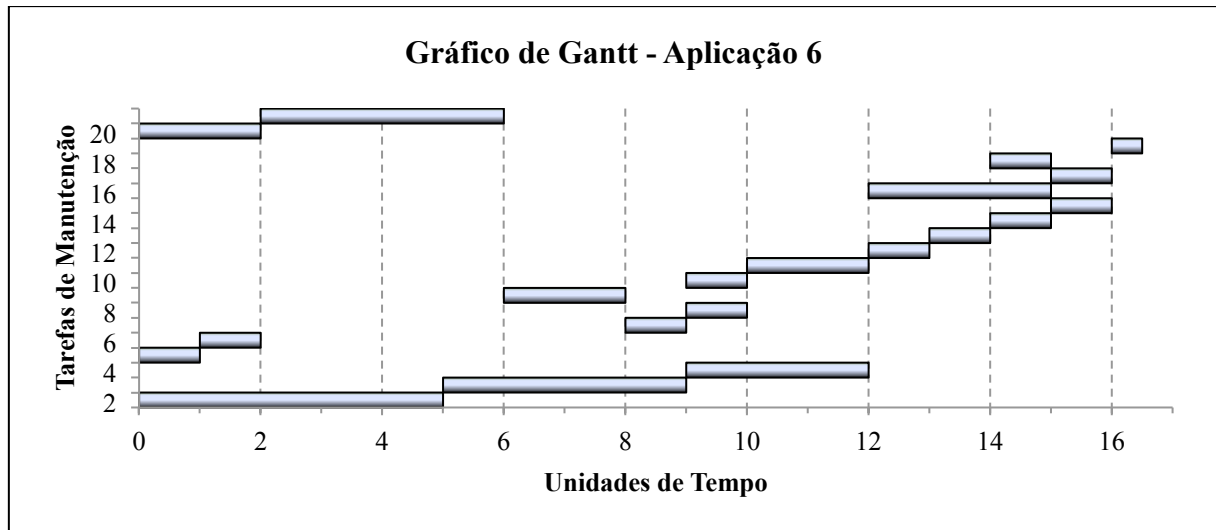


Figura 5.18 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 6.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

Ao se analisar a pertinência da solução, nota-se que o sequenciamento apresentado pelo modelo respeita todas as relações de precedência conforme ilustradas na Figura 5.15. Com relação às OMs 2, 3, 4, 12, 13, 14, 15 e 19, pode-se dizer que constituem um caminho crítico, por não existem folgas entre tais OMs. Por outro lado, ocorre folga entre as atividades 9 e 11, por exemplo.

As Figuras 5.19 e 5.20 apresentam os fluxos dos recursos do tipo 1 e 2, respectivamente. A pertinência das restrições de fluxo são verificadas, uma vez que a conservação de fluxo plenamente atendida, bem como as necessidades de recurso de cada OM, em comparação com a Tabela 5.1.

De forma idêntica às análises anteriores de exemplos com dois tipos de recursos, percebe-se nas Figuras 5.19 e 5.20 que as atividades que necessitam de apenas um recurso, não aparecem no grafo de fluxo do outro recurso, e vice-versa. Na figura 5.19, a OM 12 não aparece na distribuição do recurso do tipo 1, uma vez que a mesma necessita apenas de 2 unidades do recurso 2.

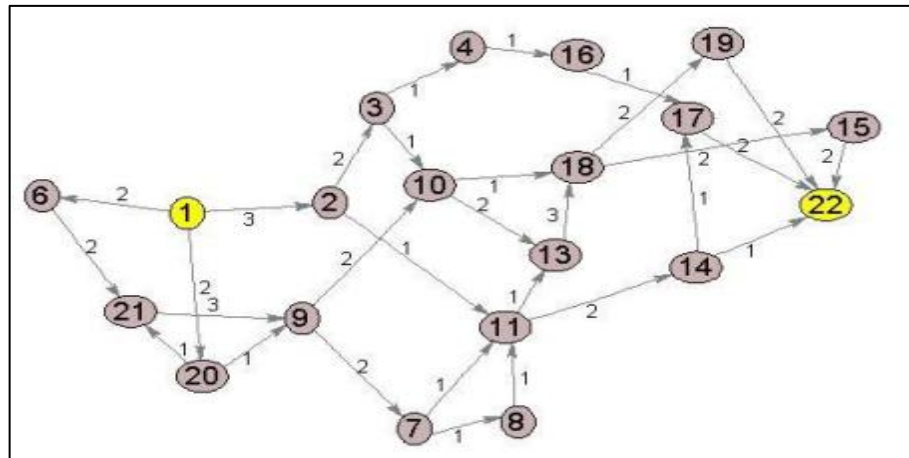


Figura 5.19 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 1 para a Aplicação 6.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

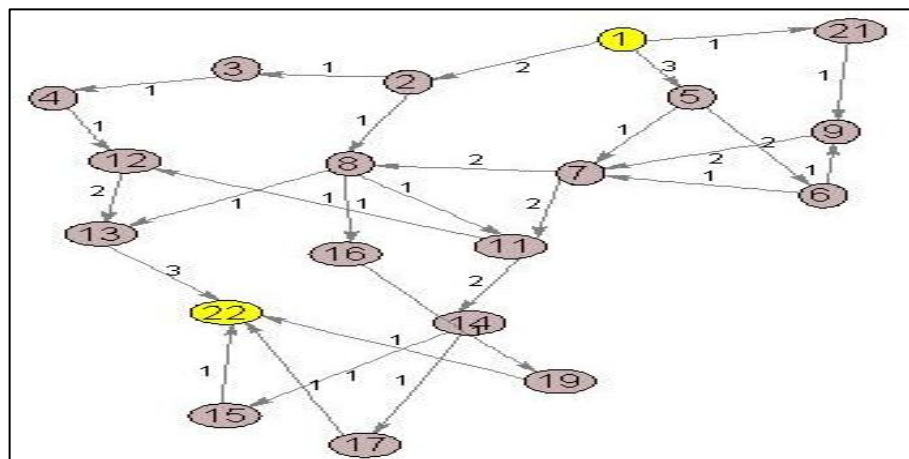


Figura 5.20 – Grafo representativo do fluxo do recurso tipo 2 para a Aplicação 6.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

5.1.7 Aplicação 7 – 20 Ordens de Manutenção, 1 Recurso, Com Disjunções

Neste exemplo, considera-se originalmente o mesmo conjunto de 20 OMs como apresentados na Figura 5.15, acrescidas de algumas relações disjuntivas, conforme mostra a Figura 5.21

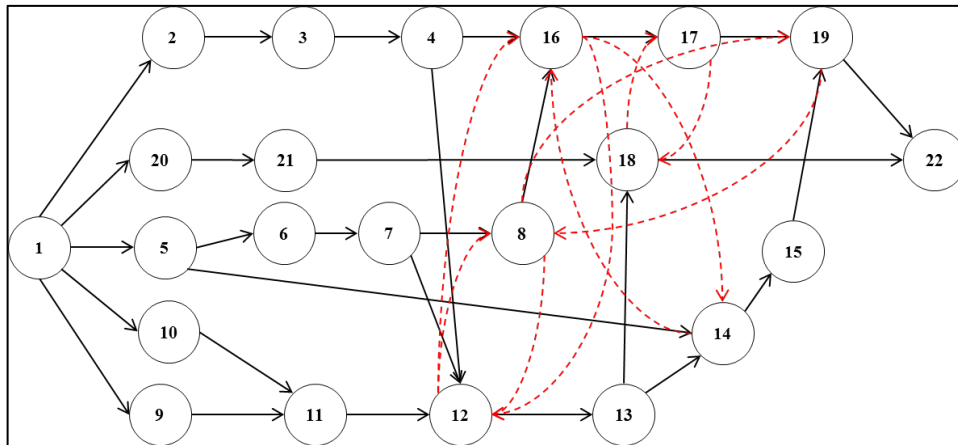


Figura 5.21 – Grafo representativo das OM's para a Aplicação 7.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

A Figura 5.22 mostra o Gantt resultante da Aplicação 7. Utilizando-se as 7 unidades disponíveis do recurso 1, o modelo encontrou um *makespan* de 18,5 unidades de tempo. Já o tempo computacional gasto foi de 113,1 segundos, com 5,4 MB de memória utilizada.

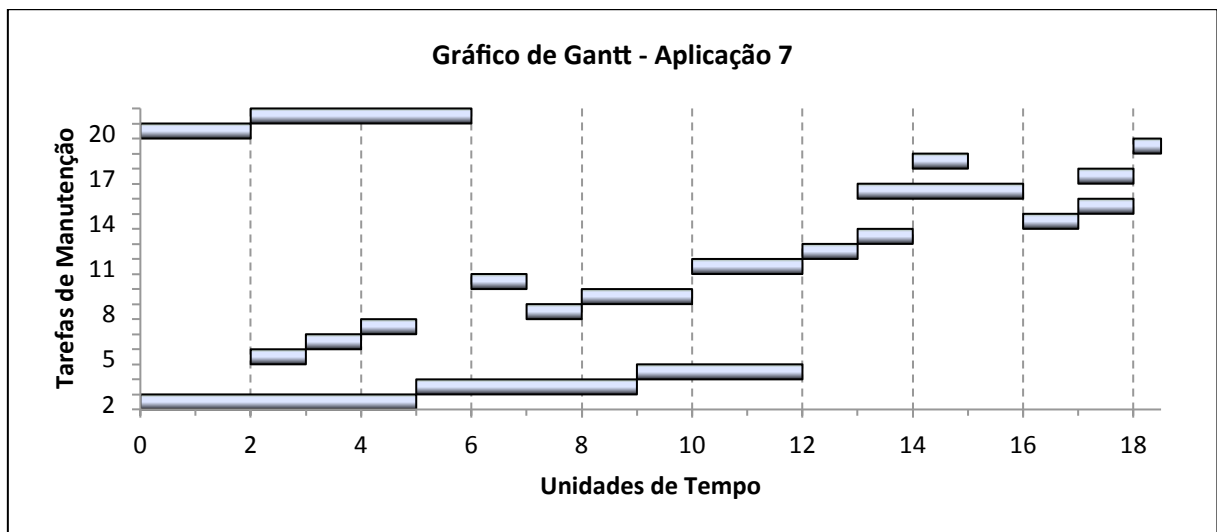


Figura 5.22 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 7.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

A comparação entre o sequenciamento apresentado pelo modelo e o grafo representativo das OM's da Figura 5.21 permite concluir que todas as relações de precedência e disjunção foram atendidas. Por exemplo, as disjunções entre as OM's 8 e 9 e as OM's 8 e 12 foram satisfeitas de tal forma que foram executadas na ordem 8-9-12. Por outro lado, a disjunção entre 17 e 18 foi executada na ordem 18-17, além de apresentarem folga.

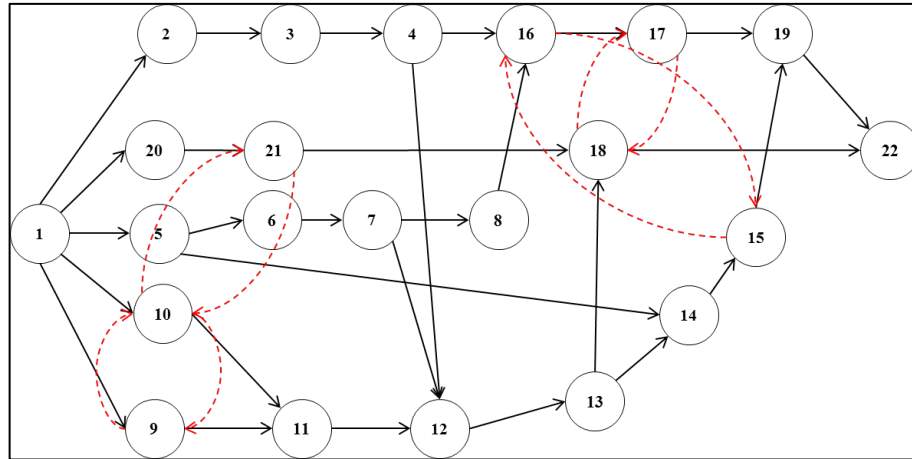


Figura 5.24 – Grafo representativo das OM's para a Aplicação 8.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

Os tempos de execução das OM's do exemplo são os mesmo da Tabela 5.2, assim como as respectivas quantidades de recursos necessários a cada OM.

Finalmente, a Figura 5.25 mostra o Gantt resultante da Aplicação 8. Utilizando-se 7 unidades disponíveis do recurso 1 e 6 do recurso 2, o modelo encontrou um *makespan* de 16,5 unidades de tempo. Já o tempo computacional gasto foi de 43,7 segundos, com 5,7 MB de memória utilizada.

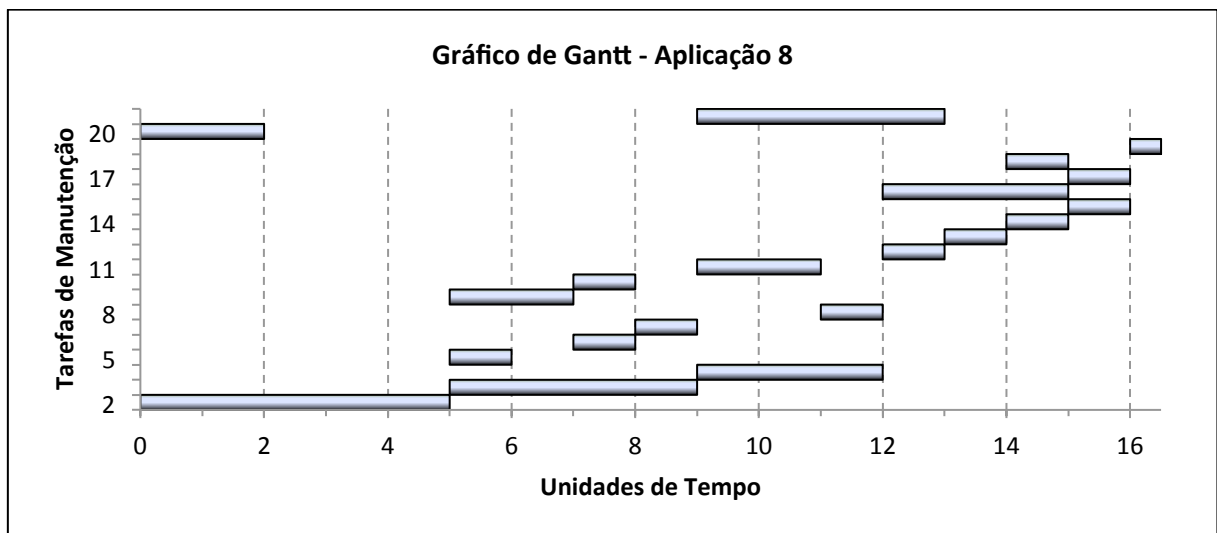


Figura 5.25 – Gráfico de Gantt para a Aplicação 8.

Fonte: (Pesquisa Direta, 2011).

Todas as relações de precedência e disjunção foram satisfeitas comparando-se o Gantt da solução obtida acima com a figura 5.24.

A presença de mais um recurso e/ou a alteração nas relações disjuntivas entre as OM's em relação ao exemplo 7 fizeram com que o *makespan* reduzisse.

Aplicação	OM's	Tipos de Recursos	Nº recursos tipo 1 / tipo 2	Tempo de resolução (s)	Memória utilizada (MB)	Makespan (u.t.)
1	15	1	7 / -	14,1	2,4	12
2	15	2	7 / 6	15,3	3,3	14
3	15	1	7 / -	1,3	2,2	14
4	15	2	7 / 6	10,6	3,3	14
5	20	1	7 / -	50,2	5,2	16,5
6	20	2	7 / 6	46,7	6,6	16,5
7	20	1	7 / -	113,1	5,4	18,5
8	20	2	7 / 6	43,7	5,7	16,5

Tabela 5.3 – Resumo dos resultados das aplicações do modelo.

5.5 Considerações gerais sobre os resultados

O modelo apresentou comportamento variado com a modificação dos seus parâmetros. Em alguns casos, o acréscimo de alguns complicadores, como diversidade de recursos, reduziu inclusive o valor final do *makespan*.

Pela própria formulação do modelo, esperava-se um fluxo contínuo de manutentores entre as OM's. Entretanto, não houve uma preocupação inicial em se analisar o nível de ocupação do pessoal de manutenção. A análise do fluxo dos recursos, neste caso, indica uma distribuição que, combinada às outras restrições do modelo, resultam no valor de *makespan* ótimo. Neste contexto, cabe aos decisores a tarefa de ponderar a distribuição dos seus trabalhadores em função do nível de complexidade das OM's, periculosidade, dentre outros.

Em termos de análise do modelo, a ideia de se empregarem aplicações com números distintos de atividades visa testar o seu comportamento tendo em vista problemas de portes diferentes. Evidentemente que, neste caso, a definição do horizonte de planejamento impacta diretamente na quantidade de OM's a serem executadas. O esforço computacional do

modelo cresce com o aumento do problema. Dessa forma, definir horizontes de planejamento menores (com um número menor de OMs) constitui-se uma alternativa para garantir soluções ótimas em um tempo computacional aceitável. Entretanto, é necessário atentar-se para uma possível perda de otimalidade global na adoção dessa estratégia.

A aplicação prática do modelo tal como apresentado neste trabalho está sujeito a algumas condições restritivas, fato que pode comprometer a qualidade e a viabilidade dos resultados. Entretanto, esta formulação inicial mostra-se uma ferramenta de utilidade real no contexto da programação de manutenção. O tempo usualmente gasto para se realizar um sequenciamento de manutenção é infinitamente superior ao tempo computacional gasto pelo modelo para propor uma solução viável, justificando, pois, a sua aplicabilidade.

O próximo capítulo encerra as discussões desta monografia, apresenta algumas conclusões e sugere uma ampliação dos horizontes deste trabalho com propostas de desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

A programação das tarefas de manutenção preventiva e preditiva possui impacto direto na disponibilidade operacional dos equipamentos e, conseqüentemente, no volume de produção. Entretanto, o tempo destinado à manutenção está relacionado não somente à disponibilidade dos ativos, mas também ao quantitativo de mão-de-obra disponível, a duração das Ordens de Manutenção (OMs), à complexidade das tarefas etc. Dessa forma, faz-se necessário que a programação das OMs sejam eficazes na distribuição dos recursos, de tal forma que o tempo total de intervenção na planta produtiva seja minimizado.

O modelo de programação linear inteira mista proposto neste trabalho soluciona o Problema de Sequenciamento com Restrição de Recursos aplicado à Manutenção, aqui denominado como PSMRR. O modelo realiza o sequenciamento de atividades de manutenção previamente planejadas dentro de um horizonte predeterminado, além de promover a alocação dos recursos renováveis de manutenção às tarefas a serem realizadas.

O contexto de aplicação do modelo considerado é baseado em um ambiente cuja lógica de funcionamento foi descrita ao longo deste trabalho, sobretudo nos capítulos 3 e 5.

Por meio do levantamento teórico realizado, foi possível perceber de que forma a literatura trata e aborda o Problema de Sequenciamento de Manutenção. Além disso, notou-se que o tema ainda é pouco explorado na literatura nacional, reforçando ainda mais a relevância deste trabalho.

O modelo foi testado levando-se em consideração alguns exemplos, evidenciando seu potencial de aplicação prática. No que tange aos resultados obtidos, os valores mínimos encontrados para o *makespan* e a distribuição dos recursos de manutenção para as tarefas evidenciam as questões relativas ao *trade off* quantitativo de mão-de-obra X tempo de paradas de manutenção. Esta conclusão fornece aos decisores uma relação entre ter mais mão-de-obra (mais custos) e realizar a manutenção em menos tempo (produzir mais) ou ter baixo efetivo (menos custos) e alongar o tempo de manutenção (menos produção).

A apresentação dos resultados em forma de gráficos de Gantt e grafos representativos de fluxo foi uma alternativa a fim de facilitar a visualização e análise dos resultados obtidos. Dessa forma, observando-se o Gantt e o grafo de fluxo, tem-se uma noção quase imediata da distribuição dos recursos e do sequenciamento das atividades, ao passo que a solução apresentada em tabelas exigiria maior abstração do leitor.

Existem algumas situações que não foram levadas em consideração no modelo. Uma delas é a própria natureza estocástica da manutenção. Outro aspecto não abordado seria a possibilidade de subcontratação temporária. Por fim, outro ponto desconsiderado é a priorização de OMs por sua criticidade em relação à disponibilidade total da planta e do custo da falha associada à postergação da OM.

Como trabalhos futuros, a sugestão é aprimorar o modelo. Deseja-se consolidar a programação da manutenção como uma abordagem de projeto e utilizar a noção de fluxo para recursos que não sejam renováveis; considerar o caráter estocástico no modelo, agregando uma probabilidade ao desvio de recursos de manutenção no caso de falhas imprevisíveis; acrescentar a possibilidade de contratação temporária como forma de reduzir o *makespan*; adicionar restrições relativas à priorização de OMs e aos custos associados; sobretudo, investigar técnicas de resolução exatas e heurísticas que melhorem o tempo computacional do modelo.

Em suma, espera-se que este trabalho seja significativo em conteúdo e discussão, tornando-se uma ferramenta eficaz no auxílio às decisões acerca da programação e sequenciamento de Manutenção.

REFERÊNCIAS

- AHIRE, S. et al Workforce-constrained Preventive Maintenance Scheduling Using Evolution Strategies. **Decision Sciences**, n. 31, p. 833–859, dez. 2000. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1540-5915.2000.tb00945.x/abstract>>. Acesso em: 14 mai. 2011.
- ALARDHI, M.; HANNAM, R. G.; LABIB, A. W. Preventive maintenance scheduling for multi-cogeneration plants with production constraints. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 13, n. 3, p. 276-292, 2007. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1621333&show=abstract>>. Acesso em: 14 mai. 2011.
- ANDRADE, M. M. **Introdução à metodologia do trabalho científico**. 6. Ed. São Paulo: Atlas, 2003.
- ARENALES, M. et al. **Pesquisa Operacional: para cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- ARTIGUES, C.; MICHELON, P.; REUSSER, S. Insertion techniques for static and dynamic resource-constrained project scheduling. **European Journal of Operational Research**, v. 149, p. 249-267, set 2003. doi:10.1016/S0377-2217(02)00758-0
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANUTENÇÃO – ABRAMAN. **Documento Nacional**. 2009. Disponível em: <<http://www.abraman.org.br>>. Acesso: 01 Mai. 2011.
- AZEVEDO, A. A. **Otimização da manutenção preventiva em linhas de montagem: estudo de case em uma empresa de manufatura contratada do setor eletrônico**. 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- BUDAI, G.; HUISMAN, D.; DEKKER, R. Scheduling preventive railway maintenance activities. **Journal of the Operational Research Society**, v. 57, n. 9, p. 1035-44, set. 2006. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/4102318>>. Acesso em: 14 mai. 2011.

CANTO, S. V. Application of Benders decomposition to power plant preventive maintenance scheduling. **European Journal of Operational Research**, v. 184, n. 2, p. 759-777, jan. 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VCT-4NFXG9C-1/2/14e6bd5038f9326fdb83c2068a7219c>>. Acesso em: 14 mai. 2011.

DIJKSTRA, M. C. et al. Planning the size of organization of KLM's Aircraft Maintenance Personnel. **Interfaces**, v. 24, n. 6, p. 47-58, nov-dez 1994. Disponível em: <<http://interfaces.journal.informs.org/cgi/reprint/24/6/47>>. Acesso em: 14 mai. 2011.

GOBER, T. A. Computerized Planning and Scheduling. In: MOBLEY, R. K., HIGGINS, L. R., WIKOFF, D. J. (Coord.). **Maintenance Engineering Handbook**. 7. Ed. New York: McGraw-Hill, 2008. p. 79-90.

KARDEC, A., NASCIF, J., BARONI, T. **Gestão estratégica e técnicas preditivas**. 1ª Reimpressão. Rio de Janeiro: Qualitymark: ABRAMAN, 2007.

KISTER, T. C.; HAWKINS, B. **Maintenance Planning and Scheduling Handbook: Streamline Your Organization for a Lean Environment**. North Charleston (USA): Elsevier, 2006.

MOBLEY, R. K. Total Productive Maintenance In: MOBLEY, R. K., HIGGINS, L. R., WIKOFF, D. J. (Coord.). **Maintenance Engineering Handbook**. 7. Ed. New York: McGraw-Hill, 2008. p. 41-58.

MOGHADDAM, K. S. **Preventive Maintenance and replacement scheduling: models and algorithms**. 2008. 93 f. Dissertation (Doctor on Philosophy Candidacy) – Departament of Industrial Engineering, University of Louisville – USA, 2008.

MORABITO, R., PUREZA, V., Modelagem e Simulação. In: MIGUEL, P. A. C. (Coord.). **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. p. 165-194.

PAZ, N. M. & LEIGH, W. Maintenance Scheduling: issues, results and research needs. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 14, n. 8, p. 47-69, 1994. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=848808&show=abstract>>. Acesso: 14 mai. 2011.

QUAN, G. et al. Searching for multiobjective preventive maintenance schedules: Combining preferences with evolutionary algorithms. **Eur. J. Opl. Res.**, v. 177, n. 3, p. 1969–1984, mar. 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VCT-4J7B0YF-1/2/f1b18278edd76f70e5931b169ec95f42>>. Acesso em: 14 mai. 2011.

REASON, J. **Cognitive Engineering in the Aviation Domain**. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2000.

ROBERTS, S. M.; ESCUDERO, L. F. Scheduling of plant maintenance personnel. **J. Opt. Theory and Appl.** v. 39, n. 3, p. 323–343, mar. 1983. DOI: 10.1007/BF00934541.

SAFAEI, N.; BANJEVIC, D.; JARDINE, A. K. S. Bi-objective workforce-constrained maintenance scheduling: a case study. **Journal of the Operational Research Society**, v. 62, n. 6, p. 1005-1018, jun. 2011. DOI: 10.1057/jors.2010.51.

SHARMA, A.; YADAVA, G. S.; DESHMUKH, S. G. A literature review and future perspectives on maintenance optimization. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 17, n. 1, p. 5-25, 2011. DOI: 10.1108/13552511111116222

VIANA, H. R. G. **Planejamento e Controle da Manutenção**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

VIEIRA, C. S.; CARVALHO, C. R. V.; PINTO, R. L. U. F. O problema de sequenciamento em projetos com Restrições de recursos modelado como um problema de Programação linear inteira mista. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, XLII, 2010, Bento Gonçalves. **Anais eletrônicos...** Bento Gonçalves: UFSM, 2010. Disponível em: <<http://www.xliisbpo.iltc.br/>>. Acesso: 28 abr. 2011.

VIEIRA, C. S. et al. Um modelo de programação linear inteira para o problema de sequenciamento em projetos com restrição de recursos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, XLIII, 2011, Ubatuba. (Aprovado para publicação).

WAGNER, H. M.; GIGLIO, R. J.; GLASER, R. G. Preventive Maintenance Scheduling by Mathematical Programming. **Management Science**, v. 10, n. 2, p. 316–334, jan. 1964. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2627301>>. Acesso em: 14 mai. 2011.

XENOS, H. G. d'Philippos. **Gerenciando a Manutenção Produtiva**. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda., 2004.

YAO, X.; et al. Optimization of preventive maintenance scheduling for semiconductor manufacturing systems: models and implementation. In: IEEE JOINT INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL APPLICATIONS, 2001, Mexico-city. **Electronic Proceedings**... Mexico-city: 2001. p. 407-411.