

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

UM ESTUDO DA INTEGRAÇÃO DE UM MÉTODO DE
PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO E DECISÃO MULTICRITÉRIO

Flávia Cordova Klein

Porto Alegre, abril de 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

UM ESTUDO DA INTEGRAÇÃO DE UM MÉTODO DE
PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO E DECISÃO MULTICRITÉRIO

Flávia Cordova Klein

Orientador: Prof. José Luís Duarte Ribeiro, Dr. Eng.

Banca Examinadora:

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, Ph.D.
PPGEP / UFRGS

Profa. Giovana Savitri Pasa, Dra. Eng.
DEPROT / UFRGS

Prof. Miguel Afonso Sellitto, Dr. Eng.
PPGEPS / UNISINOS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Área de concentração: Sistemas de Produção

Porto Alegre, abril de 2007

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Prof. José Luís Duarte Ribeiro, Dr. Eng.
Orientador PPGEF / UFRGS

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, Ph.D.
Coordenador PPGEF / UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, Ph.D.
PPGEF / UFRGS

Profa. Giovana Savitri Pasa, Dra. Eng.
DEPROT / UFRGS

Prof. Miguel Afonso Sellitto, Dr. Eng.
PPGEPS / UNISINOS

Ao Daniel, por todo o apoio e incentivo

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria Helena e Lauri, por estarem sempre ao meu lado e apoiarem as minhas decisões. À minha irmã, Júlia, por ser minha melhor amiga.

Ao Daniel, por todo o incentivo ao longo do mestrado, pela paciência, pelos conselhos e pelo carinho.

Ao meu orientador, José Luís Duarte Ribeiro, pelo grande apoio e orientação para a conclusão do mestrado.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, pelos ensinamentos.

Aos colegas de mestrado, pelo companheirismo, especialmente durante o primeiro ano de curso.

Aos colegas de trabalho, especialmente ao meu chefe, José Luís Terribile, pelo incentivo.

A todos que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho é estudado o problema do atendimento de prazos na execução de serviços. O objetivo da pesquisa é propor um método de planejamento de produção para uma empresa prestadora de serviços de construção que atua no setor de telecomunicações. Após a descrição e análise do processo da empresa, são identificados os principais aspectos que devem ser considerados para a elaboração de um método de programação de atividades adequado. Cinco métodos são propostos e testados através de simulação. A análise dos resultados revela que o método ATC – *Apparent Tardiness Cost*, desenvolvido por Vepsalainen e Morton (1987), é superior aos demais em relação ao principal objetivo considerado, a minimização dos atrasos ponderados.

Palavras-chave: programação e controle da produção, análise multicriterial, telecomunicações.

ABSTRACT

This work approaches the problem of meeting due dates in the service industry. The objective of this research is to propose a production planning method for a company that is responsible for projecting and building telecommunication networks. After the description and analysis of the company's process, the main aspects that must be considered for the development of a convenient scheduling method are identified. Five methods are proposed and tested through simulation. The ATC rule – Apparent Tardiness Cost, created by Vepsalainen and Morton (1987), shows the best results regarding the main objective considered, the minimization of weighted tardiness.

Keywords: scheduling, multicriteria analysis, telecommunications.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Tema e objetivos	12
1.2. Justificativa para o estudo	13
1.3. Metodologia	14
1.4. Delimitações do trabalho	16
1.5. Estrutura do trabalho	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1. Programação de Atividades	18
2.1.1. Histórico	20
2.1.2. Gráficos de Gantt, PERT e CPM	20
2.1.3. Programação de Atividades com Restrições de Recursos	25
2.1.4. Formulação Matemática e Notação	27
2.1.5. Medidas de desempenho para o seqüenciamento	30
2.1.6. Métodos de Seqüenciamento	36
2.1.7. Método de enumeração total	37
2.1.8. Métodos de <i>branch and bound</i>	37
2.1.9. Métodos baseados em busca local	40
2.1.10. Métodos baseados na análise de gargalos	42
2.1.11. Regras de despacho	43
2.2. Análise Multicriterial	48
2.2.1. Abordagens Multicritério	49
2.2.2. Escolha dos atributos	51
2.2.3. MAUT (<i>Multi-Attribute Utility Theory</i>)	52

2.2.4. AHP (<i>Analytic Hierarchy Process</i>)	53
2.2.5. Funções de valor.....	57
3. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO	59
3.1. Análise da empresa e do processo	59
3.1.1. A empresa.....	60
3.1.2. O processo.....	62
3.1.3. Análise do processo	64
3.2. Proposta para programação das atividades	70
3.2.1. Função objetivo	71
3.2.2. Estimativas de tempos	72
3.2.3. Análise dos <i>setups</i>	73
3.3. Critérios para diferenciação dos trabalhos	74
3.4. Métodos propostos para a programação das atividades	78
3.4.1. Método 1: Seqüenciamento baseado no prazo.....	83
3.4.2. Método 2: Seqüenciamento baseado na prioridade.....	84
3.4.3. Método 3: Seqüenciamento baseado na fila.....	84
3.4.4. Método 4: Seqüenciamento baseado na folga.....	85
3.4.5. Método 5: Seqüenciamento baseado na prioridade, prazo e folga	86
4. TESTE E DISCUSSÃO DOS MÉTODOS PROPOSTOS	87
4.1. Algoritmo desenvolvido para simulação	88
4.2. Resultados	98
4.3. Análise dos resultados	103
4.4. Considerações referentes à implementação dos algoritmos	106
4.5. Considerações referentes à utilidade do método proposto.....	108
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114
APÊNDICE A: Matriz de <i>setups</i>	118
APÊNDICE B: Dados de entrada para os testes.....	121
APÊNDICE C: Código para a simulação, método 5	131
APÊNDICE D: Resultados da simulação, método 5.....	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico de Gantt.....	21
Figura 2: Representação orientada a eventos e atividades.....	23
Figura 3: Representação por gráfico disjuntivo	29
Figura 4: Representação de seqüência por gráfico disjuntivo	30
Figura 5: Procedimento <i>branch and bound</i>	38
Figura 6: Matriz de comparações.....	55
Figura 7: Estrutura da empresa.....	61
Figura 8: Fluxograma de atividades do processo.....	63
Figura 9: Fluxograma para equipes de coordenação	79
Figura 10: Fluxograma para equipes de projeto.....	81
Figura 11: Fluxograma para equipes de implantação.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Escala para comparações par-a-par	54
Tabela 2: Índices de referência para cálculo de consistência.....	56
Tabela 3: Pesos para os critérios.....	77
Tabela 4: Níveis de referência para pontuação dos trabalhos.....	78
Tabela 5: Lista de trabalhos para simulação (parcial)	87
Tabela 6: Programação de atividades para equipes de coordenação, método 5 (parcial)	99
Tabela 7: Programação de atividades para equipes de projeto, método 5 (parcial)	100
Tabela 8: Programação de atividades para equipes de implantação, método 5 (parcial)	101
Tabela 9: Análise de atrasos, método 5 (parcial)	102
Tabela 10: Comparação dos atrasos	104
Tabela 11: Comparação dos tempos totais de <i>setup</i>	105
Tabela 12: Análise de atrasos do método 4 para as duas formas propostas para o cálculo das folgas	106
Tabela 13: Análise de atrasos do método 5 para as duas formas propostas para o cálculo das folgas	107
Tabela 14: Análise de atrasos do método 5 com diferentes valores de k	107

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as empresas enfrentam crescentes dificuldades para garantir o sucesso de seus negócios. A grande oferta de produtos e serviços em muitos setores do mercado tende a tornar os clientes mais cuidadosos nas suas escolhas. Além de qualidade, os clientes buscam os menores preços e os menores prazos, entre outras vantagens.

No caso de serviços feitos sob encomenda, nos quais apenas após o pedido é iniciado o processo de atendimento ao cliente, é importante conhecer em detalhe cada uma das etapas de produção e as relações existentes entre elas. Somente dessa forma, pode-se prever o tempo necessário para atender cada pedido e, portanto, comprometer-se com datas de entrega condizentes com a realidade da empresa.

Muitas vezes, a realização dos trabalhos na seqüência em que eles chegam a cada setor (ou seja, quando as filas de trabalhos formadas entre as etapas de produção são atendidas segundo ordem de chegada – FIFO¹), não é a melhor solução para atender os prazos prometidos. Pode ser interessante priorizar pedidos, mesmo que isso signifique desrespeitar a ordem das filas de trabalhos. É o caso, por exemplo, de atender primeiro os pedidos mais recentes, mas com prazos menores de finalização. Muitas vezes, a forma como as tarefas são distribuídas gera períodos ociosos ou o acúmulo de trabalhos em filas, possivelmente desnecessárias. Além desses exemplos, inúmeros outros motivos podem incentivar a priorização de certos trabalhos em relação a outros.

O problema do seqüenciamento das atividades é bastante estudado na literatura (T'KINDT e BILLAUT, 2004; NAGAR et al., 1995, ELSAYED e BOUCHER, 1994). Embora muitos métodos de seqüenciamento sejam desenvolvidos com objetivos de otimizar a produção, Pinedo (1995) comenta que deve sempre ser questionada a necessidade de se utilizar um sistema de seqüenciamento, dados os custos associados à sua criação e

¹ *First In, First Out*: regra de seqüenciamento em que um trabalho não pode ultrapassar outro enquanto esperam em uma fila.

implementação. Em geral, é preferível trabalhar com algoritmos simples, que tragam benefícios e possam ser implementados sem exigir muitas adaptações.

Para que seja eficaz, a programação das atividades deve levar em consideração diversos aspectos dos trabalhos, incluindo a duração estimada das atividades previstas, as relações de precedência entre elas, as restrições impostas pela disponibilidade de recursos e verba, e as datas de entrega (SHTUB et al., 1994).

Nesta pesquisa, busca-se identificar as principais variáveis que devem ser analisadas para uma correta priorização dos trabalhos, tomando-se o caso de uma empresa do setor de telecomunicações. Com base nas variáveis escolhidas, propõe-se um método de programação de atividades que auxilia a distribuição das tarefas aos recursos disponíveis.

1.1. Tema e objetivos

O presente estudo tem como objetivo a elaboração de um método para a programação de atividades (mais especificamente, um algoritmo) que, uma vez desenvolvido, poderá ser usado em contextos análogos ao dessa pesquisa.

A pesquisa focaliza o problema de seqüenciamento de atividades para empresas prestadoras de serviços, com processos produtivos mais flexíveis que os processos de manufatura de bens tangíveis. É estudada uma situação em que os tempos de processamento necessários em cada atividade podem variar de acordo com o trabalho, o que torna o problema mais complexo do ponto de vista do seqüenciamento.

Neste contexto, é analisada a programação das atividades em uma empresa que atua no setor de telecomunicações, levando em consideração principalmente a disponibilidade de recursos (equipes, no caso) e os prazos prometidos para a conclusão dos trabalhos. É proposta também uma diferenciação dos trabalhos, a ser realizada com o auxílio de análise multicriterial.

Em resumo, pode-se descrever o objetivo principal do trabalho como sendo a elaboração de um método de seqüenciamento de atividades para uma empresa que atua no setor de telecomunicações (projeto e implantação de redes). O método deve levar em consideração, principalmente, o número de recursos (equipes) disponíveis, os prazos dos trabalhos e a diferenciação estratégica dos mesmos.

Os objetivos secundários dessa pesquisa são os seguintes:

- compreender o processo produtivo da empresa;
- estudar os métodos de programação de atividades propostos na literatura;
- estudar métodos para diferenciação dos trabalhos;
- identificar métodos de programação que incorporem a diferenciação dos trabalhos.

A partir da compreensão das relações entre as atividades do processo escolhido, realiza-se a modelagem do problema e desenvolve-se um método de programação de atividades que visa trazer melhorias e mostrar-se eficiente, principalmente, do ponto de vista do atendimento dos prazos.

1.2. Justificativa para o estudo

Do ponto de vista acadêmico, o presente trabalho visa testar, em um ambiente de produção real, alguns dos métodos de seqüenciamento encontrados na literatura. Dada a estrutura do problema estudado, estágios diferentes do processo são tratados de formas diferentes em relação à programação de atividades.

A pesquisa na área de programação de atividades é bastante extensa (BELTON e ELDER, 1996; NAGAR et al., 1995; LEE et al., 1997; KANET e LI, 2004), porém poucos são os trabalhos que associam essa programação a uma estratégia de diferenciação dos trabalhos (VEPSALAINEN e MORTON, 1987; KANET e LI, 2004).

Vepsalainen e Morton (1987) citam alguns custos que podem ser associados aos atrasos dos trabalhos: a perda da simpatia do cliente em relação à empresa, a perda de vendas futuras, além de custos decorrentes de entregas de urgência. De acordo com os autores, esses custos variam de forma significativa de cliente para cliente, e mesmo de trabalho para trabalho. Assim, pesos estratégicos deveriam ser utilizados para a priorização dos trabalhos. Kanet e Li (2004) também apresentam um estudo a respeito da utilização de pesos para os trabalhos. Arkin e Roundy apud Kanet e Li (2004) sugerem, por exemplo, a utilização de pesos proporcionais ao tempo de processamento dos trabalhos, argumentando que aos trabalhos mais longos correspondem produtos mais caros, aos quais devem ser associados custos de atraso maiores. No estudo desenvolvido por Ely (2002), os trabalhos são classificados em quatro níveis de grau de importância, que são considerados para a

priorização dos trabalhos. Embora os autores citados utilizem ponderação dos trabalhos como forma de diferenciá-los, não são sugeridos métodos para atribuição dos pesos estratégicos. Torna-se necessário, portanto, para o presente estudo, a determinação desses pesos com base nas características do processo.

Do ponto de vista prático, na empresa estudada, percebe-se claramente a necessidade de uma programação de atividades que organize e torne mais eficiente a realização dos trabalhos. Atualmente, não é utilizada uma sistemática clara para a programação de atividades. A programação, realizada apenas para horizontes de tempo relativamente pequenos, serve apenas para orientação das equipes de trabalho, e é realizada de forma não padronizada para todas as equipes. Verificou-se também que grande parte dos trabalhos é concluída em atraso em relação ao prazo estipulado, o que resulta no pagamento de multas por parte da empresa estudada.

Percebe-se, também, que a empresa não trabalha com um método de diferenciação formal dos trabalhos, embora em algumas situações específicas as diferenças entre os trabalhos fiquem evidentes. Conforme observado, as equipes de coordenação podem, quando necessário, interferir no processo de outras equipes, indicando trabalhos que devem ser priorizados, por exemplo. Essa situação ocorre principalmente porque a informação da prioridade do trabalho não é conhecida por todas as equipes. Neste trabalho, propõe-se que a todos os trabalhos seja associada essa informação, através da utilização de pesos, para que todas as equipes possam programar suas atividades com base no conhecimento das prioridades da empresa.

O desenvolvimento de um método para a programação das atividades do processo tende a trazer diversos benefícios, entre eles a redução do valor das multas pagas em função dos atrasos e maior satisfação do cliente.

1.3. Metodologia

Quanto à forma de abordagem do problema, uma pesquisa pode ser classificada em quantitativa ou qualitativa (SILVA e MENEZES, 2005). Enquanto a pesquisa quantitativa visa analisar aspectos quantificáveis, traduzindo em números opiniões e informações, a pesquisa qualitativa visa analisar os fenômenos do ponto de vista qualitativo, pois trata de fenômenos que não podem ser traduzidos em números. Com base nas definições apresentadas, a

presente pesquisa pode ser classificada como quantitativa, uma vez que os resultados obtidos pelos diferentes métodos propostos serão avaliados quantitativamente.

Em relação à natureza da pesquisa, o presente estudo pode ser classificado como uma pesquisa aplicada, pois objetiva gerar conhecimento para aplicação prática, sendo dirigido à solução de problemas específicos. Em oposição à pesquisa aplicada, existe a pesquisa básica, voltada a verdades e interesses universais, e sem aplicação prática prevista (SILVA e MENEZES, 2005).

Kerlinger (1975) classifica como pesquisa metodológica estudos que visam à elaboração de métodos, instrumental para medidas ou modelos que podem servir como instrumentos a serem utilizados em outras pesquisas. O presente estudo, portanto, também pode ser categorizado como pesquisa do tipo metodológica.

A primeira fase do estudo é uma fase exploratória, para observação do processo, familiarização com suas peculiaridades e identificação de possibilidades de melhoria.

Ainda na fase exploratória, é realizada uma revisão da literatura a respeito dos assuntos relacionados ao tema. Esta etapa do trabalho visa reunir, analisar e discutir as informações publicadas sobre o tema, com o objetivo de fundamentar teoricamente o objeto de investigação da pesquisa (VARGAS, 2001). Na presente pesquisa, a revisão da literatura está voltada para dois principais assuntos: modelos de programação de atividades e métodos para avaliação multicritério.

Com base nos assuntos estudados e considerando as características do processo escolhido, são propostos métodos para o seqüenciamento das atividades. Os métodos são escolhidos dentre os métodos verificados na literatura, considerando as adaptações necessárias. Esses métodos selecionados são testados através de experimentação em laboratório e os resultados são analisados e comentados. Em função da forma como o problema é apresentado, pode-se classificá-lo como um problema de pesquisa operacional. É escolhido um objetivo e, respeitando-se as restrições, procura-se otimizar esse objetivo.

Após a análise dos resultados, são apresentadas observações e conclusões a respeito do trabalho como um todo. A partir da análise crítica do estudo, são propostas sugestões para trabalhos futuros.

1.4. Delimitações do trabalho

Neste trabalho, a atenção está voltada para o caso da programação de atividades para uma empresa de prestação de serviços. Foi escolhida para o estudo uma empresa de construção de redes que atua no setor de telecomunicações, no Estado do Rio Grande do Sul. Trata-se de uma empresa que tem como cliente a empresa que presta os serviços de telecomunicações para os usuários finais.

Dentro da empresa escolhida, foi analisado o setor responsável pelo projeto e implantação de redes: a Coordenação de Projeto e Implantação. Dentro do setor, foram estudados os aspectos referentes ao processo de projeto e implantação, buscando-se compreender as atividades, as relações entre elas, o comportamento das equipes frente às filas de trabalhos pendentes e as características dos trabalhos.

Ao longo de toda a pesquisa, é dada ênfase para a questão do atendimento dos prazos prometidos para conclusão dos serviços, buscando-se avaliar os atrasos gerados pelos diferentes métodos de seqüenciamento propostos no desenvolvimento do trabalho. Dentro desse contexto, busca-se propor uma diferenciação dos trabalhos através da utilização de pesos, que visam indicar às equipes a importância da execução de cada trabalho dentro do prazo estabelecido.

Por não ter aparentado ser uma questão tão crítica, na empresa, quanto a questão dos prazos, não são propostos métodos para avaliação da qualidade dos serviços. Em trabalhos futuros, poderiam ser avaliados este e outros aspectos do problema.

Também não se pretende propor, nesta pesquisa, uma forma de calcular os tempos de processamento necessários para as atividades. Para o teste dos modelos, são utilizadas estimativas de tempos correspondentes aos tempos de trabalhos já realizados. Para que o método seja aplicado aos novos trabalhos, é recomendável desenvolver uma forma de estimação dos tempos que resulte em valores mais precisos do que as estimativas realizadas hoje na empresa.

1.5. Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo (o atual), são apresentados os aspectos gerais do trabalho, os principais objetivos, a justificativa para

a escolha do tema, a metodologia a ser empregada, as delimitações e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo, é apresentado o referencial teórico sobre os assuntos abordados nesta dissertação. Na primeira parte do capítulo 2, é apresentado um estudo sobre os principais aspectos que envolvem o problema de seqüenciamento de atividades. É dispensada atenção especial ao caso de processos com recursos finitos, que é o tipo de processo identificado na empresa analisada como estudo de caso deste trabalho.

Na segunda parte do capítulo 2, é apresentado um estudo a respeito do processo de análise multicriterial. Este assunto tem importância para o presente trabalho, pois através de análise multicriterial são identificados os principais aspectos a serem considerados para uma adequada diferenciação dos trabalhos.

No capítulo 3, é apresentado o problema do seqüenciamento especificamente para a empresa estudada. É apresentada a descrição da empresa e do processo escolhidos para o estudo e são propostos métodos para melhoria do processo, sendo consideradas as restrições do problema e os objetivos definidos.

No capítulo 4, são apresentados os testes (simulações) realizados com o objetivo de comparar os métodos propostos. Os resultados obtidos são apresentados e analisados criticamente.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões, limitações do estudo e sugestões para pesquisas futuras.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta revisão teórica aborda dois assuntos: o seqüenciamento de atividades e a análise multicriterial.

O seqüenciamento de atividades diz respeito ao processo de decisão que resulta na definição da seqüência de atividades a ser executada por cada recurso (equipe de trabalho ou máquina, por exemplo) (PINEDO, 1995). Na medida em que se assume que cada recurso iniciará a próxima tarefa assim que ele estiver disponível (não gerando, propositalmente, períodos de ociosidade), o seqüenciamento indica, também, o instante em que cada recurso estará executando cada tarefa. Assim, neste estudo, o termo seqüenciamento é considerado equivalente a programação de atividades ou planejamento de atividades.

Para que traga os resultados desejados, o seqüenciamento deve visar maximizar (ou minimizar) um certo objetivo, ou vários, a serem definidos pelo pesquisador. Neste sentido, a análise multicriterial será útil para identificar e priorizar esses objetivos e auxiliar na sua incorporação ao processo de seqüenciamento.

2.1. Programação de Atividades

De acordo com Elsayed e Boucher (1994), o problema do seqüenciamento de trabalhos é um problema complexo e, embora venha recebendo considerável atenção dos pesquisadores, ainda está distante de ser completamente resolvido. Já foram encontradas soluções ótimas para problemas envolvendo um número pequeno de máquinas mas, para problemas maiores, ainda não foram desenvolvidos métodos que tragam soluções ótimas.

Os autores definem o problema do seqüenciamento como segue:

Sejam n trabalhos a serem processados, cada um com tempo de setup, tempos de processamento e prazo. Para ser realizado, cada trabalho deve ser processado em diversas máquinas. É necessário estabelecer a seqüência destes trabalhos nas máquinas para otimizar certo critério de desempenho (ELSAYED e BOUCHER, 1994, p. 291).

Para Pinedo (1995), a programação de atividades aborda a questão da alocação dos recursos a tarefas no tempo. É basicamente um processo de tomada de decisão, que tem como objetivo a otimização de um ou mais aspectos pré-definidos.

Em resumo, de acordo com Shtub et al. (1994), a programação das atividades deve responder às seguintes questões:

- Se cada uma das atividades for realizada conforme o planejamento, quando será terminado o trabalho?
- Quais são as tarefas mais críticas para a execução do trabalho (em termos de prazos)?
- Quais tarefas podem ser postergadas, sem que isso comprometa o andamento do trabalho como um todo?
- Mais especificamente, quando cada atividade deve iniciar e terminar?

Neste estudo, é dispensada maior ênfase ao problema da programação de atividades para o caso em que os recursos disponíveis são finitos. Essa restrição na disponibilidade dos recursos representa melhor a maioria dos casos reais verificados nas empresas. A empresa estudada para essa pesquisa também dispõe de um número de recursos finito. Nesta pesquisa, os recursos analisados correspondem às equipes responsáveis pela realização dos trabalhos.

Nos próximos tópicos são apresentados um breve histórico do assunto e um estudo a respeito dos métodos de programação de atividades propostos na literatura.

2.1.1. Histórico

Os primeiros métodos para planejamento de atividades foram desenvolvidos na década de 50, como parte da Pesquisa Operacional (TKINDT e BILLAUT, 2005). Tais métodos, amplamente aceitos e colocados em prática na época, ainda hoje são utilizados em conjunto com os novos métodos. É o caso dos Gráficos de Gantt, por exemplo, que ainda hoje são utilizados para explicitar cronogramas (STHUB et al., 1994).

De acordo com Pinedo (1995), os trabalhos que tratam de seqüenciamento começaram a surgir a partir da década de 60. Dentre os estudos mais antigos citados por ele, pode-se destacar Muth e Thompson (1963), Conway, Maxwell e Miller (1967) e Baker (1974).

Recentemente, as pesquisas vêm se direcionando à programação de atividades com restrição de recursos disponíveis. Nesse caso, consideram-se as restrições de recursos no momento de realizar a programação. Geralmente, nos casos reais, é impossível realizar todos os trabalhos assim que eles se tornam disponíveis para execução. O trabalho fica aguardando em filas (estoques intermediários, por exemplo) até que a próxima máquina em que ele deve ser processado se torne disponível.

Modelos de produção baseados no sistema *just-in-time*, por exemplo, buscam trabalhar com estoques mínimos (idealmente, nulos). Com a redução dos estoques, os problemas existentes no processo ficam visíveis e a correta programação da produção torna-se ainda mais importante para que se mantenha um bom fluxo produtivo (CORRÊA e GIANESI, 1998).

2.1.2. Gráficos de Gantt, PERT e CPM

A primeira técnica científica desenvolvida para planejamento e controle de produção foi o Gráfico de Gantt (ELSAIED e BOUCHER, 1994). Esta técnica foi desenvolvida, inicialmente, para controlar as horas produtivas e as horas paradas de recursos humanos ou máquinas. As horas paradas eram classificadas de acordo com as suas causas: falta de operador, falta de ferramentas, necessidade de manutenção, necessidade de preparação, falta de trabalho disponível, etc (CONTADOR e CONTADOR, 1998).

Na figura 1 está representado um exemplo de um Gráfico de Gantt, no qual duas máquinas realizam quatro trabalhos, cada um com um determinado tempo de processamento em cada máquina.

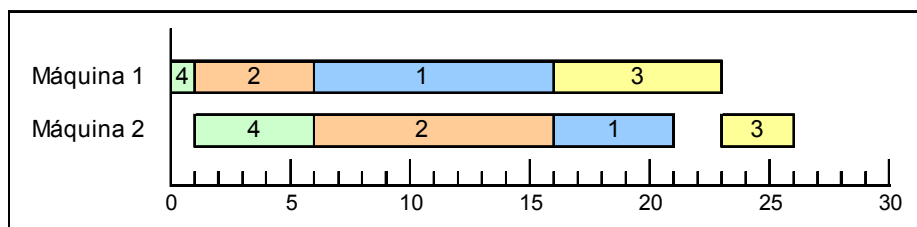


Figura 1: Gráfico de Gantt

Fonte: Richmond, 1968

Por sua simplicidade e clareza, os Gráficos de Gantt são utilizados em fábricas e empresas prestadoras de serviços (GAITHER, 1994; STHUB et al., 1994).

Uma vez que todos os trabalhos planejados para cada estação de trabalho estão representados graficamente, os supervisores podem verificar rapidamente o andamento real do trabalho e compará-lo com o planejado. A ferramenta permite, portanto, que supervisores identifiquem áreas problemáticas e tomem providências logo que os atrasos são identificados. Dessa forma, as ações corretivas são rápidas e evitam que outros setores sofram conseqüências desse atraso também.

Esta técnica, no entanto, não é adequada para o acompanhamento de projetos mais complexos. Nesses casos, seriam gerados muitos gráficos, ou seria necessário agrupar atividades. Em qualquer uma das opções, perder-se-ia a característica de clareza e simplicidade do método e, principalmente, a noção clara das relações entre as atividades (GAITHER, 1994).

Embora o controle através dos gráficos de Gantt seja importante, muitas vezes a elaboração dos gráficos se torna trabalhosa e, nesses casos, o controle vem sendo realizado através de planilhas eletrônicas (CONTADOR e CONTADOR, 1998).

No final da década de 1950, técnicas mais elaboradas, como PERT (*Program Evaluation and Review Technique* – Técnica de Avaliação e Revisão de Programas) e CPM (*Critical Path Method* – Método do Caminho Crítico), foram desenvolvidas e amplamente aceitas e implementadas por diversas empresas.

O CPM foi desenvolvido em 1957, por Kelley e Walker, para programação de projetos de manutenção em plantas químicas. O PERT foi desenvolvido em 1959, pela marinha americana em conjunto com a empresa de consultoria Booz, Allen & Hamilton, como uma ferramenta de desenvolvimento e pesquisa para um projeto da marinha. Com a utilização do PERT, o projeto foi concluído vinte e quatro meses antes do prazo previsto inicialmente (ELSAYED e BOUCHER, 1994; CONTADOR e CONTADOR, 1998).

As duas técnicas são semelhantes em diversos aspectos, diferindo apenas por refinamentos presentes no PERT e não considerados no CPM (GAITHER, 1994). Atualmente, as novas versões do PERT e CPM têm se tornado cada vez mais parecidas, e comumente chamadas de PERT/CPM (KRAJEWSKI e RITZMAN, 2002).

As técnicas PERT e CPM têm como base o diagrama de atividades, no qual devem ser representadas todas as atividades necessárias para a realização do projeto. Uma vez conhecido o diagrama de atividades, conclusões são baseadas neste diagrama: tempos totais previstos para os projetos, folgas entre atividades, etc.

A elaboração do diagrama consiste basicamente em representar todas as atividades, evidenciando as relações de precedência e os tempos de duração de cada uma delas. Os principais fatores do diagrama são: atividades, eventos e precedência. Elsayed e Boucher (1994) definem esses termos como:

- Atividade: qualquer tarefa que consuma tempo e recursos para completar uma etapa do projeto. Atividades devem iniciar e terminar com um evento.
- Evento: um instante no tempo que sinaliza o início ou fim de uma atividade, ou, ainda, um ponto em que o término de todas as atividades precedentes permite o início das atividades sucessoras.
- Precedência: termo que descreve a relação entre duas ou mais atividades do diagrama. Geralmente escreve-se $A < B$, indicando que a atividade B só poderá iniciar após o término da atividade A, ou seja, A deve preceder B. Observar que $A < B$ e $B < C$ implica em $A < C$.

Os diagramas podem ser representados de duas formas: com as atividades em arco (AOA – *Activity-on-arc*), ou com as atividades em nós (AON – *Activity-on-node*). A figura 2 mostra uma comparação entre as duas representações. Na figura 2, as atividades S e T devem ser completadas antes que a atividade U seja iniciada. Ou seja, $S < U$ e $T < U$. No modo de representação AOA (na parte esquerda da figura 2), as atividades são escritas ao longo dos arcos, que ligam um evento a outro. Por enfatizar os eventos, esta representação é dita orientada a eventos. Essa mesma seqüência de atividades pode ser representada

pela forma AON (na parte direita da figura 2), em que as atividades são representadas nos nós e os arcos indicam as relações de precedência entre elas. Esta representação é chamada de orientada a atividades.

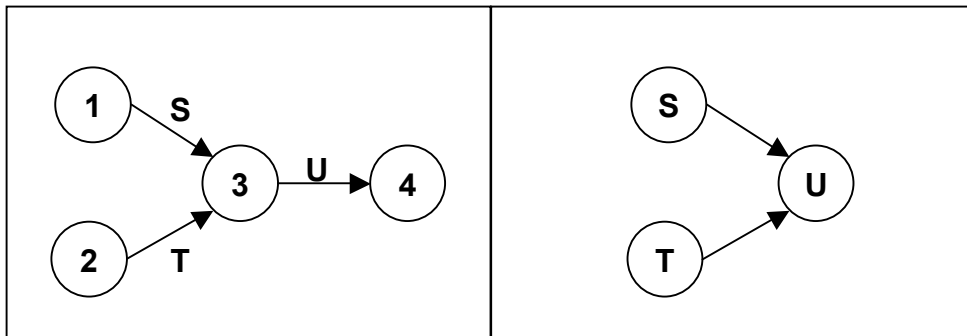


Figura 2: Comparação entre a representação orientada a eventos (esquerda) e orientada a atividades (direita)

Fonte: Krajewski e Ritzman, 2002

Pode-se observar que a elaboração do diagrama exige que os envolvidos identifiquem claramente todas as etapas necessárias para a realização do projeto. Construindo o diagrama, as relações de precedência são explicitadas, assim como as atividades cruciais para o andamento do projeto dentro do prazo estimado. Pode-se visualizar, por exemplo, quais as atividades mais críticas (que afetam mais o tempo total de duração do projeto) e quais atividades podem ser postergadas sem que isso influencie o tempo total do projeto.

Após identificar todas as atividades do projeto, devem ser calculadas estimativas de tempo para cada atividade.

As duas técnicas são diferentes do ponto de vista do método de estimativa dos tempos: enquanto o CPM trabalha com tempos determinísticos para cada atividade, o PERT calcula o tempo relativo a cada atividade de maneira probabilística, obtendo, ao final, um tempo total estimado com um certo nível de confiança (ELSAYED e BOUCHER, 1994).

Quando se utiliza o CPM, trabalha-se com uma estimativa de tempo para cada atividade. No PERT, trabalha-se com três estimativas (ELSAYED e BOUCHER, 1994; CONTADOR, 1998):

- Estimativa de tempo otimista (t_o): tempo necessário para realização da atividade considerando situação ideal (melhor caso).

- Estimativa de tempo pessimista (t_p): tempo necessário para a atividade caso ocorram todos os problemas possíveis (pior caso).
- Estimativa de tempo provável (t_m): tempo usualmente requerido para a atividade (tempo gasto em situações normais).

A partir destas estimativas, calcula-se o tempo médio (t_m) e a variância (V_t) para cada atividade, pressupondo uma distribuição beta de probabilidades, conforme representado nas equações 1 e 2:

$$t_M = \frac{t_o + 4 \cdot t_m + t_p}{6} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$V_t = \left(\frac{t_p - t_o}{6} \right)^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Como se pode observar, considera-se que a situação normal tem quatro vezes mais chance de ocorrer do que as situações otimista ou pessimista.

Conhecendo os tempos médios de cada atividade, pode-se então analisar o diagrama de atividades em maior profundidade. A principal tarefa nesta etapa é identificar o caminho crítico, ou seja, a seqüência de atividades mais longa do diagrama – é esta seqüência que determinará a duração total do projeto. As atividades que fazem parte do caminho crítico são chamadas atividades críticas. Qualquer atraso na execução destas tarefas implicará em um atraso no tempo total do projeto, a não ser que o atraso seja compensado por outra atividade do caminho crítico.

É interessante notar que, no caso do PERT, deve-se prestar atenção não apenas ao caminho crítico, mas também aos caminhos com tempos totais próximos ao tempo total do projeto, em função das probabilidades consideradas para cada atividade (FITZSIMMONS e FITZSIMMONS, 2000).

Um conceito importante para a programação das atividades é o conceito de folga. Uma vez definidas as relações de precedência e identificado(s) o(s) caminho(s) crítico(s), podem ser calculadas as folgas do sistema.

Para uma melhor compreensão do conceito de folga, é interessante definir, para cada atividade, as seguintes datas (ELSAYED e BOUCHER, 1994; CONTADOR, 1998):

- Primeira data de início (ES – *Earliest Start*): é o primeiro instante no qual a atividade pode ser iniciada.

- Primeira data de término (EF – *Earliest Finish*): é o primeiro instante no qual a atividade pode ser terminada. Corresponde à soma da primeira data de início com a duração da atividade.
- Última data de início (LS – *Latest Start*): é a última data em que a atividade pode ser iniciada sem que isso provoque um atraso no tempo de realização do trabalho como um todo.
- Última data de término (LF – *Latest Finish*): é a última data para concluir a atividade sem que isso provoque um atraso no tempo de realização do trabalho como um todo. Corresponde à soma da última data de início com a duração da atividade.

Agora, pode-se definir a folga de uma atividade como a diferença entre a primeira e a última data de início, o que equivale à diferença entre a primeira e a última data de término (ELSAYED e BOUCHER, 1994). Para a atividade A, por exemplo, a folga pode ser calculada conforme indicado na equação 3:

$$F(A) = LS - ES = LF - EF \quad (\text{Eq. 3})$$

Pode-se concluir, portanto, que as atividades que não pertencem ao caminho crítico terão valores de folga positivos. As atividades do caminho crítico serão as atividades com menor folga: a folga será nula quando o prazo estabelecido para conclusão do trabalho for igual à soma das durações das atividades do caminho crítico (CONTADOR, 1998).

As técnicas PERT e CPM representaram um avanço para os estudos de programação de atividades para o caso de projetos. No entanto, ambas supõem um número infinito de recursos disponíveis, o que restringe seu uso em muitas situações reais (ELSAYED e BOUCHER, 1994).

Embora as duas técnicas sejam úteis para visualizar e compreender as relações entre as atividades, elas não auxiliam na alocação das atividades aos recursos disponíveis.

2.1.3. Programação de Atividades com Restrições de Recursos

Diversos métodos vêm sendo desenvolvidos para lidar com os problemas de seqüenciamento mais complexos. Os métodos procuram modelar o problema de forma a refletir melhor a situação real encontrada em indústrias e empresas prestadoras de serviços.

Sendo assim, parece natural que os métodos modernos incorporem à sua modelagem a restrição de recursos disponíveis para a execução de serviços. Como recursos podem ser considerados máquinas, funcionários, matérias-primas, verba para investimento, espaço físico para estoques, entre outros. Nos casos reais, todos estes aspectos devem ser analisados no momento da programação da produção, sob risco de ser gerada uma programação impossível de ser realizada na prática. Além de garantir a possibilidade de realizar a produção conforme o programado, a identificação e análise prévia destas restrições podem auxiliar a reduzir custos.

Os modelos de seqüenciamento podem ser classificados em dois grandes grupos: os modelos determinísticos e os modelos estocásticos. No caso dos modelos determinísticos, considera-se que os tempos de processamento em cada máquina são conhecidos e exatos. Já no caso dos modelos estocásticos, não se conhecem exatamente as informações referentes aos trabalhos: os tempos de processamento e prazos, por exemplo, podem ter apenas uma distribuição conhecida (PINEDO, 1995; NAGAR et al., 1995).

A programação das atividades de um determinado processo geralmente visa otimizar um objetivo pré-estabelecido. A definição do objetivo é uma das etapas mais importantes de qualquer programação de atividades, pois o método a ser utilizado para o seqüenciamento será escolhido em função disto. Existem métodos, por exemplo, que trazem bons resultados em relação a um critério de avaliação, porém podem ser métodos pobres quando analisados por outros critérios (NAGAR et al., 1995).

Dentre os principais critérios de desempenho a serem otimizados pela programação de atividades, pode-se citar (ELSAYED e BOUCHER, 1994):

- tempo de realização dos trabalhos (*makespan*);
- tempo médio do trabalho no sistema;
- média de atrasos dos trabalhos;
- percentual de trabalhos atrasados;
- tempos de *setups*;
- tempos de espera dos trabalhos nas filas;
- tempo ocioso das máquinas.

Pinedo (1995) cita também outros critérios, como:

- atraso máximo;
- soma ponderada dos tempos de realização dos trabalhos;

- soma ponderada dos atrasos;
- soma ponderada dos trabalhos atrasados.

2.1.4. Formulação Matemática e Notação

A seguir é apresentada a notação utilizada nesse trabalho para representar os problemas de seqüenciamento. Esta notação é vastamente utilizada na literatura. Entre os autores que a utilizam podem ser citados Pinedo (1995), Elsayed e Boucher (1994), Sun e Noble (1999).

Considera-se n o número de trabalhos a serem processados. Para os casos em que existe mais de um recurso a ser analisado (equipes ou máquinas, em paralelo ou em estágios diferentes), considera-se m o número de recursos. Utiliza-se o subscrito j para identificar os trabalhos e o subscrito i para identificar o recurso.

As características básicas do processo produtivo podem ser representadas pelas seguintes variáveis:

- Tempo de processamento (p_{ij}): tempo necessário de processamento do trabalho j no recurso i .
- Data de liberação (r_j , *release date*): instante em que o trabalho j chega ao sistema, ou seja, instante a partir do qual o trabalho pode ser processado.
- Prazo (d_j , *due date*): é o prazo para execução do trabalho j .
- Peso (w_j , *weight*): é a importância do trabalho j quando comparado aos demais trabalhos. Segundo Pinedo (1995), esse peso pode representar, por exemplo, o custo de manter o trabalho no sistema ou o valor já adicionado ao trabalho.
- Tempo de *setup* (s_{ijk}): é o tempo necessário para preparação do recurso i para executar o trabalho k , após ter executado o trabalho j .

Para uma determinada seqüência de atividades, pode-se analisar, por exemplo, as seguintes medidas de desempenho:

- Tempo de realização dos trabalhos (C_{max} , *makespan*): é o tempo total necessário para a execução de todos os trabalhos. Equivale ao tempo necessário até a finalização do último trabalho a deixar o sistema. O tempo de realização de cada trabalho (C_j) é chamado de *flow time*, e indica o tempo de permanência do

trabalho no sistema, desde que é recebido até sua conclusão (são incluídos os tempos de espera entre os estágios, os tempos referentes à interrupções, os tempos de *setup* e os tempos de processamento).

$$C_{\max} = \max(C_1, C_2, \dots, C_n) \quad (\text{Eq. 4})$$

- Desvio do prazo (L_j , *lateness*): é a diferença entre o tempo de realização do trabalho (C_j) e o prazo (d_j).

$$L_j = C_j - d_j \quad (\text{Eq. 5})$$

Pode-se perceber que o desvio do prazo pode ser positivo (indicando um atraso) ou negativo, indicando que o trabalho foi concluído antes do prazo (adiantado).

Em alguns casos, um trabalho concluído antes do prazo previsto pode ser tão inconveniente quanto um trabalho atrasado. Quando o custo de armazenagem de produtos acabados é alto, por exemplo, é natural que se deseje terminar o produto o mais tarde possível, desde que dentro do prazo prometido d_j .

- Atraso (T_j , *tardiness*): é o atraso do trabalho j em relação ao prazo d_j . Observar que, quando um trabalho é completado antes do prazo, o atraso deste trabalho é considerado igual a zero.

$$T_j = \max(C_j - d_j, 0) = \max(L_j, 0) \quad (\text{Eq. 6})$$

- Adiantamento (E_j , *earliness*): é o adiantamento do trabalho j em relação ao prazo d_j . Analogamente ao caso do atraso, quando um trabalho é concluído após d_j , considera-se que o adiantamento é igual a zero.

$$E_j = \max(d_j - C_j, 0) = \max(-L_j, 0) \quad (\text{Eq. 7})$$

- Atraso unitário (U_j): variável que indica se o trabalho j foi concluído em atraso. É utilizada em casos em que se deseja avaliar a seqüência em função do número de trabalhos atrasados, por exemplo.

$$U_j = \begin{cases} 1, & \text{para } C_j > d_j \\ 0, & \text{para } C_j \leq d_j \end{cases} \quad (\text{Eq. 8})$$

Uma vez conhecidas as principais variáveis utilizadas para representar os problemas de seqüenciamento, percebe-se que muitos objetivos e restrições podem ser representados a partir da combinação destas variáveis. Ao longo do trabalho, esta será a notação utilizada para descrever matematicamente as funções objetivo dos métodos de seqüenciamento estudados.

Outra forma de representar um problema de programação, desde que este não envolva recirculação², consiste na elaboração de gráficos disjuntivos (PINEDO, 1995). Nestes gráficos, cada operação é representada através de um nó. Os nós são ligados através de arcos sólidos – chamados arcos conjuntivos – que representam as relações de precedência entre as operações. As operações (de diferentes trabalhos) executadas em um mesmo recurso são interligadas por arcos tracejados – chamados arcos disjuntivos (PINEDO, 1995).

A figura 3 mostra um exemplo de gráfico disjuntivo, adaptado do problema estudado por Bontridder (2005). Neste gráfico, estão representados três trabalhos a serem executados em três máquinas. As operações estão numeradas de 1 a 9, sendo que as operações 4, 7 e 9 são operações finais. Normalmente, são representados no gráfico disjuntivo uma fonte (na figura 3, indicada como S), de onde partem todos os arcos conjuntivos, assim como um ponto final (na figura 3, indicada como F), no qual chegam todos os arcos conjuntivos (PINEDO, 1995).

Costuma-se representar também, ao lado de cada arco (tanto conjuntivo quanto disjuntivo), o tempo necessário para execução da operação da qual o arco parte (por definição, os arcos que partem da fonte têm tempo de processamento nulo).

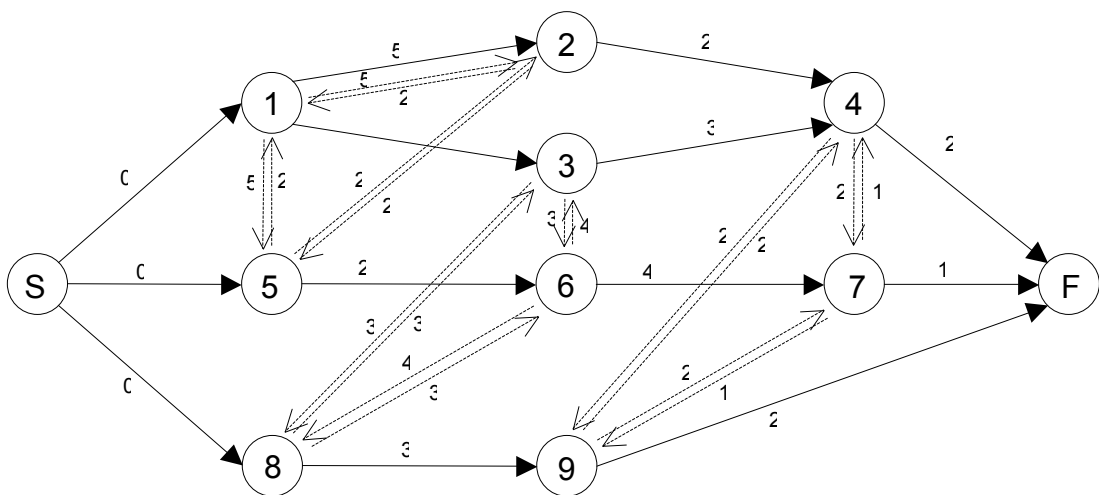


Figura 3: Representação do problema por arcos disjuntivos

Fonte: Bontridder, 2005

² Recirculação: de acordo com Bertel e Billaut (2004) e Pinedo (1995), diz-se que a recirculação ocorre quando os trabalhos são processados mais de uma vez em um mesmo recurso.

Uma programação de atividades corresponde à seleção de apenas um arco de cada um dos pares de arcos disjuntivos, de forma que o gráfico resultante, acíclico, indica a seqüência em que as operações serão realizadas nos recursos (PINEDO, 1995). Na Figura 4, está representada uma alternativa de programação de atividades apresentada por Bontridder (2005). Neste caso, pode-se perceber que as operações 1, 5 e 2, que são executadas pelo mesmo recurso, serão tratadas nessa ordem. Analisando o gráfico escolhido, pode-se deduzir, por exemplo, quais serão os tempos necessários para a realização dos três trabalhos, e em que instante eles estarão sendo processados por cada recurso.

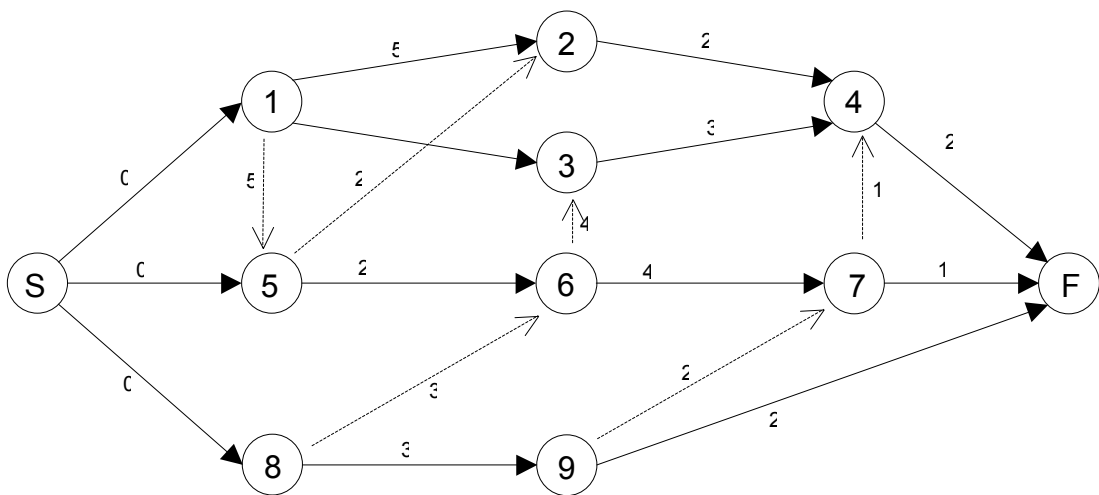


Figura 4: Representação de seqüência por arcos disjuntivos

Fonte: Bontridder, 2005

2.1.5. Medidas de desempenho para o seqüenciamento

A programação de atividades deve ser elaborada visando maximizar ou minimizar um certo objetivo. Para avaliar a qualidade de uma determinada programação de atividades definida, utiliza-se uma função objetivo, que avalia a seqüência em relação ao critério escolhido. Dessa forma, diferentes seqüências podem ser comparadas entre si, e pode-se escolher a melhor seqüência.

Os critérios de medida de desempenho podem ser classificados em dois grandes grupos: critérios regulares e não-regulares (NAGAR et al., 1995; MOSHEIOV, 2005).

Os critérios regulares correspondem às funções que não decrescem com o aumento do tempo necessário para realização dos trabalhos, e o objetivo do seqüenciamento é minimizar a medida de desempenho escolhida. Exemplos de medidas regulares são: tempo de permanência do trabalho no sistema, tempo total de realização dos trabalhos (C_{max}) e medidas que incorporam o atraso dos trabalhos (NAGAR et al., 1995; MOSHEIOV, 2005).

Com a disseminação da filosofia *just-in-time*, o foco vem se deslocando das medidas regulares para as não-regulares (NAGAR et al., 1995). As medidas não-regulares não apresentam relação de dependência do tempo de realização dos trabalhos: podem crescer ou decrescer à medida que o tempo de realização dos trabalhos aumenta (NAGAR et al., 1995; MOSHEIOV, 2005). Um exemplo de medida não regular é o adiantamento dos trabalhos em relação aos prazos.

Um dos objetivos mais citados na literatura é a minimização do *makespan* (C_{max}), que corresponde ao tempo necessário para executar todos os n trabalhos do sistema. Nesse caso, a função objetivo pode ser expressa por:

$$\min(C_{max}) = \min(\max(C_1, C_2, \dots, C_n)) \quad (\text{Eq. 9})$$

O máximo tempo de realização (C_{max}) corresponde ao tempo necessário para que o último trabalho seja completado. Geralmente, a minimização do *makespan* corresponde a uma máxima utilização dos recursos (PINEDO, 1995).

A partir dos tempos de realização dos trabalhos, pode-se ainda visar minimizar a soma dos tempos de realização de todos os trabalhos. Nesse caso, o objetivo é representado por:

$$\min\left(\sum_{j=1}^n C_j\right) \quad (\text{Eq. 10})$$

Varadharajan e Rajendran (2005) apresentam um estudo em que o objetivo do seqüenciamento é minimizar simultaneamente os dois objetivos: o *makespan* e a soma dos tempos de realização de todos os trabalhos.

Uma variação pode ser obtida quando se consideram pesos diferentes para os trabalho. Estes pesos podem representar custos de estocagem, multas por atraso, ou quaisquer outros custos associados ao tempo de permanência do trabalho no sistema. No estudo de Szwarc e Liu (1993), por exemplo, os pesos são considerados proporcionais aos tempos de processamento dos trabalhos.

A partir da função de minimização de tempos totais, pode-se obter a função objetivo para minimização dos tempos de realização dos trabalhos ponderados, representada na equação 11:

$$\min\left(\sum_{j=1}^n w_j C_j\right) \quad (\text{Eq. 11})$$

Segundo Nagar et al. (1995), os dois critérios de avaliação mais usados na literatura estão relacionados aos tempos de realização e aos atrasos dos trabalhos em relação aos prazos.

De acordo com Sun e Noble (1999), o cumprimento dos prazos prometidos tem duas implicações: quando se trata de produzir um produto ou realizar um serviço a um cliente, resulta em clientes mais satisfeitos; quando se trata de liberar partes ou produtos semi-acabados para outros estágios do processo produtivo, resulta em uma produção mais bem planejada e controlada.

Para o caso em que se deseja minimizar a soma dos atrasos de todos os trabalhos, pode-se expressar a função objetivo como:

$$\min\left(\sum_{j=1}^n T_j\right) \quad (\text{Eq. 12})$$

Analisando a função objetivo descrita na equação 12, percebe-se que todos os trabalhos são tratados igualmente, ou seja, não se estabelecem relações de importância entre os trabalhos.

De acordo com Vepsalainen e Morton (1987), a maior parte da pesquisa em relação a regras de despacho³ considera os trabalhos com penalidades iguais para os atrasos, desconsiderando a diferenciação estratégica dos pedidos dos clientes. De acordo com estes autores, os custos decorrentes de entregas atrasadas, tais como a má impressão causada no cliente, a perda de vendas futuras, e o custo de envios urgentes, variam significativamente de um cliente para outro e de um pedido para outro, e o peso estratégico implícito deve ser refletido na prioridade do trabalho.

Baker e Smith (2003) também reconhecem as diferenças existentes entre os clientes, propondo, inclusive, critérios diferentes para avaliação de trabalhos diferentes.

Introduzindo então os pesos para os atrasos dos trabalhos, chega-se à seguinte função objetivo:

³ Regras de despacho: método de seqüenciamento baseado na análise de características dos trabalhos que aguardam processamento em um determinado estágio do processo.

$$\min\left(\sum_{j=1}^n w_j T_j\right) \quad (\text{Eq. 13})$$

Outro objetivo comum é a minimização do número de trabalhos atrasados. Embora pareça menos interessante do que a minimização do somatório de atrasos, o número (ou percentual) de trabalhos atrasados é uma medida vastamente utilizada na prática e freqüentemente monitorada para medir o desempenho de setores e diretores (PINEDO, 1995). Além disso, uma vez que os trabalhos estejam concluídos, o número de trabalhos atrasados pode ser calculado facilmente e proporciona uma noção simples de ser compreendida.

Analogamente às funções de atrasos, definem-se as funções objetivo de minimização de número de trabalhos atrasados e minimização do número ponderado de trabalhos atrasados como segue:

$$\min\left(\sum_{j=1}^n U_j\right) \quad \text{e} \quad \min\left(\sum_{j=1}^n w_j U_j\right) \quad (\text{Eqs. 14 e 15})$$

Nas equações 14 e 15, U_j vale 1 para os trabalhos atrasados e 0 para os trabalhos completados dentro do prazo (indica atraso ou não). No trabalho de Ng et al. (2003) a medida de desempenho analisada é a soma ponderada de trabalhos atrasados em um ambiente de produção em que um mesmo trabalho pode ter duas operações sendo processadas, ao mesmo tempo, em dois recursos diferentes.

Pinedo (1995) ressalta que o número de trabalhos atrasados não deve ser a única medida de atendimento dos prazos. Se este for o único critério, alguns trabalhos ficarão aguardando em filas por períodos inaceitáveis.

Hoogeveen (2005) comenta que, até o final dos anos 80, era prática comum a consideração de apenas um critério como medida de desempenho. Nos problemas reais, no entanto, muitas vezes deseja-se atender uma série de objetivos e, conseqüentemente, a qualidade da solução deve ser avaliada em relação a todos os objetivos considerados importantes. Em geral, não existem soluções dominantes em relação a todos os critérios escolhidos, simultaneamente. Busca-se, nesses casos, encontrar soluções que satisfaçam, na medida do possível, os objetivos escolhidos. Essa abordagem do problema é classificada por Hoogeveen (2005) como otimização simultânea. Para esses casos, geralmente são utilizadas funções objetivo compostas.

Mosheiov (2005) propõe uma medida de desempenho bicriterial: ele busca minimizar uma função objetivo composta por uma medida regular (no caso, tempo total de realização

dos trabalhos, o *makespan*) e uma medida não regular (soma dos desvios dos tempos de finalização dos trabalhos em relação ao prazo). Ele define essa função objetivo como

$$\min(\alpha \cdot TC + (1 - \alpha) \cdot TDC) \quad (\text{Eq. 16})$$

Na equação 16, TC é o tempo total de realização dos trabalhos (*makespan*), TDC a soma dos desvios em relação ao prazo (no caso, o prazo é comum a todos os trabalhos) e α é uma constante.

Elsayed e Boucher (1994) também trabalham com uma composição de objetivos quando definem a função a ser minimizada como:

$$\min \sum_{j=1}^n (\alpha E_j + \beta T_j) \quad (\text{Eq. 17})$$

Na equação 17, E_j e T_j são, respectivamente, o adiantamento e o atraso do trabalho em relação ao prazo. Neste caso, o objetivo é penalizar tanto os trabalhos terminados antes do prazo (são os trabalhos que têm E_j maior que zero e T_j igual a zero) quanto os trabalhos terminados após o prazo (trabalhos com T_j positivo e E_j igual a zero). Neste caso, os únicos trabalhos não penalizados são os trabalhos concluídos exatamente no prazo prometido ($C_j = d_j$). Esse objetivo é coerente com os princípios *just-in-time* de produção (ELSAIED e BOUCHER, 1994; HOOGEVEEN, 2005). Elsayed e Boucher (1994) comentam que, ainda que seja consenso que o atraso do trabalho seja indesejável, trabalhos concluídos antes do prazo também devem ser evitados. A conclusão de trabalhos antes do prazo pode causar aumento nos custos de inventário, risco de perda de produção em casos de cancelamentos, além do prejuízo em casos em que os bens são perecíveis.

É interessante observar que, mesmo para o caso em que as penalidades para atrasos e adiantamentos são iguais ($\alpha = \beta$), a função objetivo descrita na equação 17 não pode ser representada através da variável L_j , desvio do prazo. Como foi explicado anteriormente, o desvio do prazo pode assumir valores positivos ou negativos. Supondo uma função objetivo de minimização da soma dos desvios em relação aos prazos:

$$\min \sum_{j=1}^n (L_j) \quad (\text{Eq. 18})$$

Percebe-se que, nesse caso, trabalhos concluídos antes do prazo podem compensar trabalhos concluídos com atraso. Essa função, portanto, representa um objetivo diferente do objetivo anterior proposto na equação 17.

O objetivo de minimização do desvio do prazo também é tratado por Ahmed e Sundararaghavan (1990), que definem a função objetivo conforme a equação 19:

$$\min \sum_{j=1}^n w_j \cdot |d_j - C_j| \quad (\text{Eq. 19})$$

Utilizando o módulo da diferença entre o prazo e o término do trabalho (equação 19), os autores visam penalizar tanto os trabalhos concluídos em atraso quando os trabalhos concluídos antes do prazo. Trata-se de uma outra forma de representar o objetivo descrito na equação 17, para o caso especial de $\alpha = \beta$ e se $w = 1$ para todos os trabalhos.

Embora as funções compostas sejam mais completas que as funções simples, por expressarem mais detalhadamente as preferências do pesquisador, Hoogeveen (2005) ressalta que muitas vezes pode haver dificuldade na definição de uma função composta adequada. Além disso, deve ser considerada a dificuldade computacional para minimizar diretamente a função escolhida.

Lova et al. (2000) apresentam uma heurística para o caso em que a programação de atividades visa satisfazer dois objetivos. No estudo, são considerados dois tipos de objetivos: um deles dependente do tempo (tempo total de realização dos trabalhos, por exemplo) e outro independente do tempo (número de trabalhos em processamento, por exemplo). No método proposto pelos autores, os objetivos são tratados separadamente. Numa primeira etapa, escolhe-se uma seqüência de atividades que minimize o objetivo relacionado ao tempo. Na segunda etapa, o segundo objetivo é tratado, porém com a restrição de que o valor da função objetivo obtido na primeira etapa não pode piorar. Esse valor é considerado um limite superior, que não pode ser ultrapassado. Nesse caso, não é utilizada uma função objetivo composta, os dois objetivos são tratados separadamente.

Hoogeveen (2005) classifica esse tipo de abordagem como otimização hierárquica ou lexicográfica. Nos problemas tratados segundo essa abordagem, define-se que um dos critérios é mais importante que o outro, e a otimização é realizada com base nessa hierarquia de objetivos.

Belton e Elder (1996) também abordam a questão de múltiplos objetivos, e propõem uma heurística em que o pesquisador pode orientar a programação de atividades. Para cada programação gerada, o pesquisador deve indicar quais os critérios que devem ser melhorados. O processo é iterativo, e a programação de atividades em elaboração é melhorada até que o pesquisador esteja satisfeito com o resultado.

Nagar et al. (1995) apresentam uma revisão da literatura em que é dado enfoque aos critérios de medida de desempenho utilizados. No artigo, os pesquisadores analisam e classificam os diferentes critérios de avaliação.

2.1.6. Métodos de Seqüenciamento

Dada a dificuldade computacional de resolver os problemas de programação de atividades através dos métodos de otimização tradicionais (baseados em programação linear, por exemplo), pesquisadores têm desenvolvido diversas técnicas visando encontrar soluções (não necessariamente ótimas, mas satisfatórias) através de métodos mais rápidos. Diversos métodos foram desenvolvidos visando satisfazer o *trade-off* existente entre qualidade da solução e tempo computacional necessário para encontrá-la (NAGAR et al., 1995).

Mesmo que alguns dos métodos propostos não ofereçam a garantia de resultarem em uma programação de atividades ótima, eles são de grande valor para solucionar os problemas reais. No entanto, Elsayed e Boucher (1994) ressaltam que, diferentemente dos métodos de enumeração total, por exemplo, os métodos heurísticos não permitem que se avalie o quão longe se está da solução ótima. Pinedo (1995) lembra que um método de *branch and bound* com um adequado cálculo dos limites inferiores para cada ramificação (ou em conjunto com o método de enumeração total), e partindo do conjunto total de soluções possíveis, também pode indicar a solução ótima.

Muitos pesquisadores desenvolveram modelos baseados em programação inteira para representar problemas de seqüenciamento. No entanto, conforme o problema se torna mais complexo, os algoritmos conhecidos não são capazes de resolvê-lo de forma eficiente. Outra abordagem seria utilizar a programação linear sem a restrição da programação inteira. Neste caso, poderiam ser utilizados diversos algoritmos de programação linear desenvolvidos para lidar com problemas maiores, porém o resultado teria de ser arredondado para o valor inteiro mais próximo. Em muitos casos, esse procedimento de arredondamento levaria a soluções muito inferiores à solução ótima (NAGAR et al., 1995).

Pinedo (1995) apresenta uma classificação dos problemas de programação de atividades em relação à sua complexidade.

O problema estudado nessa pesquisa, em que o objetivo é a minimização da soma dos atrasos ponderados dos trabalhos, pode ser classificado como NP-Completo (PINEDO, 1995; DU e LEUNG apud KANET e LI, 2004). Para esses problemas não é possível encontrar algoritmos denominados algoritmos polinomiais. Os algoritmos para resolução dos problemas de seqüenciamento são ditos de complexidade polinomial quando o número máximo de passos computacionais necessários para obtenção de uma solução ótima é função polinomial do número de trabalhos do sistema. Um passo computacional pode ser

uma comparação, uma multiplicação, ou qualquer manipulação de dados em relação a um trabalho (PINEDO, 1995).

A seguir são apresentados os principais tipos de métodos de seqüenciamento que vêm sendo desenvolvidos e utilizados para os problemas de programação de atividades com restrição de recursos.

2.1.7. Método de enumeração total

A enumeração de todas as seqüências possíveis é a técnica mais simples. É útil apenas quando são analisados problemas com pequeno número de trabalhos e máquinas, pois se torna impraticável para problemas maiores (ELSAYED e BOUCHER, 1994).

2.1.8. Métodos de *branch and bound*

Os métodos baseados em *branch and bound* são, de acordo com Pinedo (1995), os métodos mais utilizados para solucionar problemas de seqüenciamento do tipo NP-Completo.

O método consiste em analisar separadamente grupos de seqüências parciais, identificando o grupo que pode trazer melhores resultados e explorando variações no grupo escolhido. A idéia é visualizar as soluções possíveis como ramificações e analisar cada ramificação com base no limite inferior (menor valor da função objetivo, quando se deseja minimizá-la) calculado para as seqüências completas deste grupo.

Considerando n trabalhos a serem ordenados em uma máquina, podemos considerar que qualquer um dos n trabalhos poderia ocupar a primeira posição da seqüência. Representando graficamente, poderíamos partir de um nó inicial e separar as seqüências em n nós, cada um com um dos trabalhos na primeira posição. Calcula-se, para cada novo nó, o melhor valor de função objetivo possível. O nó que apresentar melhor valor será escolhido, e a partir deste nó partirão novas ramificações (serão, agora, $n-1$ novos nós) (PINEDO, 1995; ELSAYED e BOUCHER, 1994).

Seguindo este raciocínio, os nós que apresentam valores de função objetivos maiores que o valor do nó escolhido não precisarão ser analisados, todas as ramificações que partiriam deste nó podem ser desconsideradas (PINEDO, 1995). Diversos métodos podem ser utilizados para calcular os limites inferiores da função objetivo para cada ramificação (o método mais simples seria o de enumeração total). Um método para cálculo de limites inferiores para o problema de minimização de atrasos ponderados pode ser encontrado em Pinedo (1995). Um nó também pode ser eliminado com base em restrições impostas no problema ou quando já é conhecida pelo menos uma seqüência com valor de função objetivo melhor do que o limite calculado para o nó.

Freqüentemente, os procedimentos de ramificação são construídos do fim para o início, ou seja, definindo primeiro os últimos trabalhos da seqüência. Quando se trabalha com funções objetivo que visam minimizar atrasos, por exemplo, os últimos trabalhos da seqüência são os que provavelmente corresponderão aos maiores termos da função objetivo (PINEDO, 1995).

A figura 5 mostra um exemplo de procedimento *branch and bound* em que a ramificação é feita a partir do final da seqüência. Na figura, L_i é o limite inferior da função objetivo para o nó.

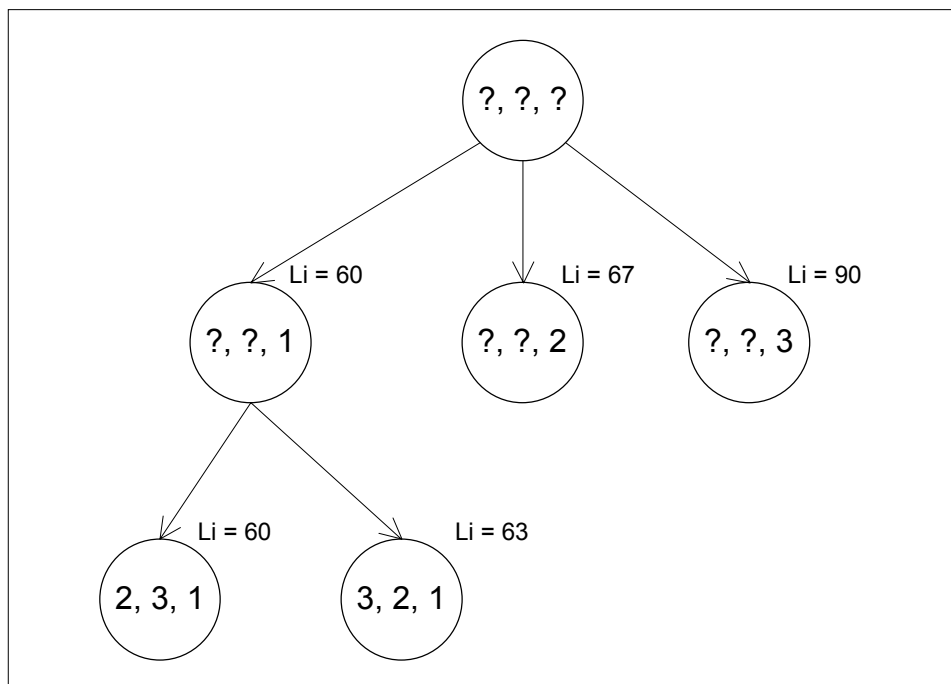


Figura 5: Representação de procedimento *branch and bound*

Fonte: adaptado de Pinedo (1995)

Na figura 5 está representado um processo de seqüenciamento de apenas três trabalhos (numerados como 1, 2 e 3) em um único recurso. Do primeiro nó, partem três grupos de seqüências: no primeiro grupo se enquadram todas as seqüências que possuem o trabalho 1 na última posição da seqüência, no segundo grupo estão as seqüências que colocam o trabalho 2 na última posição e no último grupo estão todas as seqüências nas quais o trabalho número 3 fica na última posição. Após o cálculo do limite inferior da função objetivo para cada um dos nós, verificou-se que o primeiro nó apresenta o menor valor. A partir de então, analisa-se apenas o primeiro nó. Como o exemplo da figura 5 traz apenas 3 trabalhos, o primeiro nó permite apenas duas possibilidades de seqüência: a seqüência 2-3-1 e a seqüência 3-2-1. Calcula-se o valor da função objetivo para cada uma das seqüências e define-se qual a melhor seqüência (no exemplo, é a seqüência 2-3-1).

Exemplos da utilização de métodos *branch and bound* podem ser encontrados em Clifford e Posner (2000), Yanasse et al. (2002) e Mauguière et al. (2005).

Clifford e Posner (2000) propõem um método heurístico para o cálculo dos limites inferiores das ramificações para o caso em que diversos trabalhos são iguais. Os autores agrupam os trabalhos, sendo que os trabalhos de um mesmo grupo possuem as mesmas características: mesmo tempo de processamento, mesmo prazo, etc.

Yanasse et al. (2002) utilizam um método de *branch and bound* para o problema da minimização de pilhas em aberto. No modelo proposto, o objetivo está relacionado à restrição de espaço físico existente nas proximidades da máquina.

No trabalho de Mauguière et al. (2005), métodos de *branch and bound* são propostos para um ambiente de produção em que existem períodos de indisponibilidade dos recursos. No estudo, é considerado o caso em que apenas algumas operações podem ser interrompidas (outras não).

Embora os métodos de ramificação tragam bons resultados, são métodos extremamente demorados devido ao grande número de nós que precisam ser analisados em problemas maiores (PINEDO, 1995; NAGAR et al., 1995). Muitas vezes, utiliza-se alguma heurística para eliminar alguns nós antes de iniciar o processo de *branch and bound* mas, mesmo assim, geralmente restam ainda muitos nós para analisar (PINEDO, 1995).

A grande vantagem dos métodos baseados em *branch and bound*, quando utilizados em associação com o método de enumeração total, consiste na garantia de que a seqüência encontrada é uma solução ótima (PINEDO, 1995).

2.1.9. Métodos baseados em busca local

Os métodos de busca local são métodos que, em oposição aos de busca global, não garantem uma solução ótima (PINEDO, 1995).

Estes métodos partem de uma seqüência atual (uma solução inicial, que pode ter sido encontrada por qualquer outro método), e buscam melhorá-la com pequenas alterações na seqüência, ou seja, através da análise de seqüências na vizinhança da seqüência atual. Duas soluções são chamadas de vizinhas se uma delas pode ser obtida a partir de pequenas modificações na outra (PINEDO, 1995).

Para qualquer procedimento de busca local, é importante a definição da vizinhança a ser considerada. Para problemas que envolvem apenas uma máquina, pode-se considerar vizinha uma seqüência obtida a partir da troca de posições de dois trabalhos adjacentes na seqüência original. Ampliando essa vizinhança, pode-se considerar vizinha uma seqüência obtida a partir da retirada de um trabalho de sua posição e sua inserção em outra posição da seqüência original. Em situações mais complexas (com mais estágios de máquinas, ou com máquinas em paralelo), vizinhanças mais complexas podem ser definidas (PINEDO, 1995).

Dentre os principais métodos de busca local pode-se destacar os métodos *simulated annealing*, busca tabu e os algoritmos genéticos.

O método conhecido como busca tabu é um método que impõe restrições para guiar o processo de busca, evitando ciclos e possibilitando a exploração de outras regiões do espaço de soluções. Para guiar a escolha do vizinho a ser analisado, considera-se que alguns vizinhos são proibidos (estes vizinhos pertencem à lista tabu) (VIEIRA et al., 2002; BONTRIDDER, 2005).

Os vizinhos proibidos são, por exemplo, aqueles que seriam obtidos através de movimentos opostos a movimentos realizados recentemente. A cada movimento realizado para seleção de uma nova seqüência, o movimento contrário é colocado no topo da lista tabu, e o último item da lista é apagado. Trabalha-se, geralmente, com uma lista tabu composta por 5 a 9 itens (PINEDO, 1995). Desta forma, o método busca evitar a análise de seqüências já consideradas anteriormente.

Uma vez escolhido um movimento que leva a uma nova seqüência, essa seqüência é avaliada segundo o critério considerado. Caso traga um resultado melhor do que o atual, a seqüência candidata passa a ser a atual. Caso contrário, continua-se trabalhando com a seqüência atual, testando outras seqüências na vizinhança.

Bontridder (2005) utiliza um método de busca tabu para definir a seqüência de processamento de trabalhos, tomando como objetivo a minimização dos atrasos totais ponderados. No método proposto pelo autor, as seqüências vizinhas analisadas são geradas através de troca de operações de trabalhos adjacentes. Podem ser aceitas seqüências piores do ponto de vista da função objetivo, para evitar mínimos locais.

O método conhecido como *simulated annealing* surgiu, inicialmente, como um método de simulação para o resfriamento de ligas metálicas derretidas, utilizando o conceito de transições probabilísticas. Parte-se do princípio que, em altas temperaturas, as moléculas transitam aleatoriamente para estados de maior ou menor energia. À medida que a temperatura diminui, a probabilidade das moléculas saltarem para níveis de energia maiores diminui (TANOMARO apud VIEIRA et al., 2002).

NAGAR et al. (1995) comentam que, quando comparado às outras duas técnicas, o *simulated annealing* é o método mais utilizado na literatura. O método é bastante similar à busca tabu (PINEDO, 1995). Parte-se de uma solução atual, e compara-se esta seqüência com outras seqüências (chamadas de seqüências candidatas), que podem ser obtidas, por exemplo, a partir de movimentos aleatórios na vizinhança da solução atual. Neste caso, não existe uma lista de movimentos proibidos.

Quando uma seqüência candidata se mostra melhor do que a atual, esta seqüência toma o lugar da solução atual. No entanto, diferentemente do que ocorre na busca tabu, mesmo quando uma seqüência candidata se mostra pior do que a seqüência atual (do ponto de vista do critério considerado), esta seqüência pode ser escolhida e passar a ser a seqüência atual. Quando o objetivo do seqüenciamento é a minimização de uma função objetivo, a probabilidade de uma seqüência pior do que a atual ser escolhida pode ser representada pela equação 20:

$$P(S_k, S) = \exp\left(\frac{G(S_k) - G(S)}{\beta_k}\right) \quad (\text{Eq. 20})$$

Na equação 20, S_k é a seqüência atual, e S é a seqüência candidata, que está sendo avaliada. $G(S_k)$ e $G(S)$ são os valores das funções objetivos referentes às seqüências S_k e S , respectivamente. O parâmetro β_k é um parâmetro de controle, chamado de parâmetro de resfriamento. Conforme aumenta o número de iterações k , menor é o valor de β_k , o que indica que em iterações mais avançadas, a tendência de selecionar seqüências piores que a atual diminui. Frequentemente, utiliza-se β_k igual a a^k , com $0 < a < 1$ (PINEDO, 1995).

Um exemplo da aplicação de um método de *simulated annealing* pode ser encontrado em Varadharajan e Rajendran (2005).

Os algoritmos genéticos são técnicas um pouco mais abstratas. Segundo Pinedo (1995), pode-se considerar que tanto a busca tabu quanto o *simulated annealing* são casos especiais de algoritmos genéticos.

Quando se trabalha com algoritmos genéticos, considera-se uma determinada seqüência como um indivíduo, ao qual está associado um valor de função objetivo. O conjunto de todos os indivíduos (seqüências) é chamado de população. O procedimento consiste em realizar diversas iterações, cada uma correspondente a uma nova geração de indivíduos. Indivíduos filhos são gerados através de pequenas alterações a partir dos indivíduos pais e, para manter o número constante de indivíduos na população, os indivíduos piores são eliminados. As regras para geração dos filhos e para seleção nos indivíduos que permanecem na população podem ser complexas, quase sempre baseadas nos valores das funções objetivo dos indivíduos (PINEDO, 1995).

Para solucionar o problema de seqüenciamento em um ambiente de produção com recirculação, Bertel e Billaut (2003) propõem um algoritmo genético em que as novas gerações podem ser obtidas de duas formas: através de cruzamento entre duas seqüências ou através da alteração de uma única seqüência. No processo de seleção dos indivíduos que permanecem na população, é imposta uma limitação no número de indivíduos iguais na população resultante da iteração. No trabalho, a função objetivo considerada é a minimização da soma ponderada do número de trabalhos atrasados.

Os métodos de busca local têm como principal vantagem a possibilidade de aplicação a problemas sem que seja necessário conhecer detalhadamente a estrutura do problema. Além disso, a formulação é extremamente simples e geralmente leva a soluções satisfatórias. Por outro lado, o tempo computacional necessário para a obtenção dessas soluções tende a ser maior do que as obtidas por outros métodos (PINEDO, 1995).

2.1.10. Métodos baseados na análise de gargalos

Segundo Pinedo (1995), uma das heurísticas de maior sucesso para a solução dos problemas de minimização do *makespan* em ambientes do tipo *job shop* (com mais de uma máquina) é o método baseado na análise dos gargalos de produção (conhecido como *shifting bottleneck*).

Nesse método, propõe-se o seqüenciamento de uma máquina por vez, consecutivamente, partindo-se da máquina que apresenta maior congestionamento de

trabalhos, ou seja, a máquina que representa um gargalo para o sistema. A partir de então, para cada máquina para a qual não foi determinada uma seqüência de processamento dos trabalhos, resolve-se o problema da minimização dos atrasos para aquela única máquina (ELSAYED e BOUCHER, 1994). O problema é, dessa forma, decomposto em uma série de problemas menores, que podem ser tratados individualmente.

O método de análise de gargalos é bastante flexível, permitindo adaptações para os casos em que há recirculação e para os casos em que existem máquinas em paralelo nos diferentes estágios de produção (PINEDO, 1995).

Sun e Noble (1999) utilizam o método para solucionar um problema de seqüenciamento visando minimizar a soma dos quadrados dos atrasos ponderados dos trabalhos.

2.1.11. Regras de despacho

Uma das técnicas mais freqüentemente escolhidas pelas empresas é o seqüenciamento baseado em regras de despacho (SUN e NOBLE, 1999). Esta técnica se fundamenta no seguinte princípio: sempre que um recurso está disponível para a execução de uma nova tarefa, é selecionado um trabalho dentre aqueles que aguardam processamento no recurso. Diversos métodos foram desenvolvidos seguindo essa orientação, diferindo principalmente em relação aos critérios utilizados para a escolha do trabalho a ser processado na seqüência. Uma lista das regras de despacho mais freqüentemente utilizadas pode ser encontrada em Pinedo (1995). Kanet e Li (2004) também apresentam diferentes regras de despacho (ao todo 11 regras), que foram testadas e comparadas entre si, do ponto de vista dos atrasos ponderados dos trabalhos.

De acordo com Sun e Noble (1999), o grande apelo para o uso das regras de despacho vem principalmente da sua simplicidade e eficiência frente à dificuldade computacional dos problemas de seqüenciamento.

De acordo com Pinedo (1995), as regras de despacho podem ser classificadas em regras estáticas ou dinâmicas.

As regras estáticas são aquelas que independem do tempo; dependem apenas das características do trabalho ou da máquina (PINEDO, 1995). Assim, a prioridade de um trabalho será a mesma desde que ele é recebido para execução até o instante em que é

concluído. Como exemplo desse tipo de regra, podem ser citados os modelos que priorizam os trabalhos com menor prazo.

As regras dinâmicas são aquelas em que a prioridade dos trabalhos varia em função do tempo. Isso significa que um trabalho pode ter prioridade ora maior, ora menor que outro trabalho. Isso acontece, por exemplo, com os métodos que levam em consideração a folga prevista para cada trabalho. Por folga entende-se o prazo subtraído do instante atual e do tempo de processamento necessário para completar o produto. Assim, percebe-se que a folga é uma função do tempo. Outra regra claramente dinâmica, citada por Pinedo (1995), é a regra da menor fila. Esta regra é aplicável ao caso em que existem várias máquinas semelhantes em paralelo. Quando um trabalho termina de ser processado em um estágio, ele vai para a menor fila da próxima máquina. Essa regra depende do tempo, pois a cada instante uma das máquinas em paralelo terá a menor fila.

Outra forma de classificar as regras de despacho se refere ao tipo de informação em que elas se baseiam (PINEDO, 1995). Levando em consideração esse critério, as regras podem ser classificadas em regras locais ou globais. As regras locais são mais simples, pois utilizam apenas informações sobre a fila em que o trabalho se encontra ou a próxima máquina em que o trabalho será processado. Já as regras globais podem considerar, também, informações a respeito das máquinas subseqüentes pelas quais o trabalho ainda terá que passar.

Entre as regras de despacho mais simples, pode ser citada a regra FCFS (*First Come First Served*, equivalente à regra FIFO – *First In, First Out*). De acordo com esta regra, os primeiros trabalhos a chegarem na máquina serão os primeiros a serem atendidos, respeitando a fila entre as máquinas. Quando o trabalho é processado em apenas uma máquina, esta regra equivale à regra ERD (*Earliest Release Date First*), que prioriza o atendimento dos trabalhos segundo a ordem em que foram disponibilizados para processamento no sistema (os trabalhos são priorizados em função de r_j). Quando o arranjo produtivo possui máquinas em paralelo, os dois métodos podem levar a seqüenciamentos distintos, uma vez que trabalhos processados em máquinas paralelas podem se ultrapassar, se os tempos de processamento forem diferentes. Essas regras visam equiparar os tempos de fila dos trabalhos (PINEDO, 1995) e, muitas vezes, são utilizadas para transmitir aos clientes a sensação de tratamento justo.

Outras regras comumente utilizadas são:

- Menor prazo (EDD - *Earliest Due Date*): os trabalhos com menores prazos são atendidos primeiro. O índice de priorização pode ser escrito como:

$$I_j = d_j \quad (\text{Eq. 21})$$

- Menor folga (MS - *Minimum Slack*): os trabalhos com as menores folgas são atendidos antes, segundo o índice:

$$I_j = \max(d_j - p_j - t, 0) \quad (\text{Eq. 22})$$

- Menor tempo de processamento (SPT – *Shortest Processing Time*): seleciona primeiro os trabalhos com menores tempos de processamento, seguindo uma ordem crescente do índice:

$$I_j = p_j \quad (\text{Eq. 23})$$

- Tempo de processamento ponderado (WSPT – *Weighted Shortest Processing Time*): os trabalhos são processados em ordem decrescente do índice apresentado na equação 24, que considera tanto o peso do trabalho (w_j), quando o tempo de processamento (p_j). Busca-se priorizar os trabalhos com maiores pesos e menores tempos de processamento:

$$I_j = \frac{w_j}{p_j} \quad (\text{Eq. 24})$$

- Maior tempo de processamento (LPT – *Longest Processing Time*): os trabalhos são ordenados em função do tempo de processamento (p_j), dando prioridade aos trabalhos mais longos. O índice é o mesmo da equação 23, porém nesse caso os trabalhos são ordenados de forma decrescente do índice.

$$I_j = p_j \quad (\text{Eq. 25})$$

- Folga por tempo de processamento (S/RPT – *Slack per Remaining Processing Time*): os trabalhos são atendidos em ordem crescente do índice apresentado na equação 26, que representa a razão entre a folga e tempo de processamento. Neste caso, p_j representa o somatório dos tempos de processamento em todas as máquinas pelas quais o trabalho ainda deve passar.

$$I_j = \frac{d_j - p_j - t}{p_j} \quad (\text{Eq. 26})$$

- Maior tempo de processamento na outra máquina (LAPT – *Longest Alternate Processing Time*): o trabalho é selecionado em ordem decrescente de tempo de processamento na próxima máquina. No índice apresentado na equação 27, i

indica o recurso em que o trabalho j está sendo priorizado, $i+1$ indica o próximo recurso em que ele será processado:

$$I_{ij} = p_{(i+1)j} \quad (\text{Eq. 27})$$

Pelo fato de serem relativamente simples, as regras de despacho são amplamente utilizadas em empresas manufatureiras, embora muitas vezes essa simplicidade acabe gerando um desempenho pobre (SUN e NOBLE, 1999). Pinedo (1995) comenta que, quando se busca minimizar um único objetivo, as regras de despacho trazem bons resultados. Nos casos reais, os objetivos devem considerar uma série de fatores, uma combinação de diversos objetivos, e a priorização dos trabalhos com base em um ou dois parâmetros pode levar a programações de produção não satisfatórias. Nestes casos, devem-se buscar regras de despacho mais sofisticadas, que podem ser uma composição de regras mais simples, chamadas de regras de despacho compostas.

Uma regra de despacho composta é definida como uma expressão que combina um determinado número de regras de despacho elementares, ponderadas através de parâmetros de escala (PINEDO, 1995).

Para o caso em que se deseja minimizar os atrasos ponderados, foi desenvolvida por Vepsalainen e Morton (1987) uma regra composta chamada de Custo Aparente do Atraso (ATC – *Apparent Tardiness Cost*). É uma regra que combina duas regras citadas anteriormente: WSPT (priorização dos trabalhos com menores tempos de processamento ponderados) e MS (priorização dos trabalhos com menores folgas). Para incluir os efeitos das duas regras elementares, os autores propõem que os trabalhos sejam atendidos em ordem decrescente de acordo com o seguinte índice, calculado para cada trabalho:

$$I_j(t) = \frac{w_j}{p_j} \exp\left(\frac{-\max(d_j - p_j - t, 0)}{k \cdot \bar{p}}\right) \quad (\text{Eq. 28})$$

Na equação 28, \bar{p} é o tempo médio de processamento dos trabalhos e k é um parâmetro de escala que pode ser determinado empiricamente.

De acordo com os resultados apresentados por Vepsalainen e Morton (1987), o seqüenciamento obtido com o índice apresentado se mostra eficiente quando comparado com outras regras de despacho (foram analisadas regras simples, como EDD e WSPT, e regras mais elaboradas, como a adaptação da regra COVERT⁴). Nas simulações realizadas

⁴ COVERT: Regra de despacho proposta por Carroll apud VEPSALAINEN e MORTON (1987), que leva em consideração o custo associado ao atraso do trabalho, o tempo de processamento e as folgas do sistema.

pelos autores, em um ambiente do tipo *job shop* com 10 máquinas, a regra ATC superou as demais (considerou-se como objetivo a minimização de atrasos ponderados).

Lee et al. (1997) tomam como base a regra desenvolvida por Vepsalainen e Morton (1987) e propõem uma generalização da regra, para que sejam considerados também os tempos de *setup* entre os trabalhos. Os autores denominam a regra ATCS – Custo Aparente do Atraso com *Setups* (*Apparent Tardiness Cost with Setups*). A regra proposta sugere um índice de priorização de trabalhos representado por:

$$I_j(t) = \frac{w_j}{p_j} \exp\left(\frac{-\max(d_j - p_j - t, 0)}{k_1 \cdot \bar{p}}\right) \exp\left(-\frac{s_{ij}}{k_2 \cdot \bar{s}}\right) \quad (\text{Eq. 29})$$

No índice proposto, \bar{p} é o tempo médio de processamento, k_1 e k_2 são constantes determinadas empiricamente, \bar{s} é o tempo médio de setups e s_{ij} é o setup entre o trabalho recém completado i e o trabalho j .

Baker e Bertrand propuseram em 1982 uma regra denominada MDD – *Modified Due Date*, a primeira regra simples e efetiva para minimização de atrasos (não ponderados) (KANET e LI, 2004). A regra consiste em priorizar os trabalhos segundo a ordem crescente do índice proposto:

$$I_j = \max(t + p_j, d_j) \quad (\text{Eq. 30})$$

A partir desse método, Kanet e Li (2004) propõem a regra WMDD – *Weighted Modified Due Date*. Trata-se de uma generalização da regra anterior, visando incorporar os pesos atribuídos aos trabalhos:

$$I_j = \frac{1}{w_j} (\max(p_j, (d_j - t))) \quad (\text{Eq. 31})$$

A regra WMDD proposta visa minimizar o somatório de atrasos ponderados. Quando todos os pesos são iguais as duas regras expressas nas equações 30 e 31 são equivalentes.

As regras de despacho também são interessantes quando se trabalha com ambientes de produção em que os pedidos são recebidos em diferentes momentos. Esse assunto é tratado por Hall e Potts (2004), que consideram métodos para incorporar a uma programação de atividades já definida os novos trabalhos recebidos, sem que isso provoque atrasos significativos nos demais trabalhos.

2.2. Análise Multicriterial

Na Pesquisa Operacional tradicional, geralmente se trabalha com objetivos baseados na maximização ou minimização de um único critério (geralmente uma medida quantitativa de retorno financeiro) (WAGNER, 1986).

Nas situações reais, por outro lado, em processos de decisão mais complexos, os decisores deparam-se com inúmeros fatores a serem analisados para que seja escolhida a melhor alternativa.

Segundo Shtub et al. (1994), o aspecto multicriterial do processo de decisão surge porque os resultados devem ser avaliados em termos de diversos objetivos ou critérios. Pode-se ter uma série de propriedades, desejáveis ou indesejáveis, que representam as preferências do pesquisador.

Nagar et al. (1995) apontam que uma solução ótima em relação a um dado critério pode ser uma solução ruim para outro critério, o que evidencia a importância de considerar mais de um critério no processo de decisão. Conseqüentemente, um pesquisador que procura satisfazer diversos objetivos irá se deparar com *trade-offs*, que podem, inclusive, ressaltar aspectos interessantes do processo.

Embora a maior parte dos problemas reais envolvam diversos critérios, a pesquisa nesta área é escassa quando comparada ao caso dos problemas monocriteriais (NAGAR et al., 1995). De acordo com Bana e Costa et al. apud Ensslin et al. (2001), a comunidade científica só começou a pesquisar e propor métodos multicritério a partir da década de 70. A partir de então, houve um progresso significativo, tanto teoricamente quanto operacionalmente, no desenvolvimento de funções utilidade para o tratamento de múltiplos objetivos (KEENEY, 1981).

Novos métodos surgiram com o objetivo de auxiliar na escolha, ordenação ou classificação de alternativas, buscando incorporar os diversos aspectos relevantes ao processo, em oposição aos métodos monocriteriais da Pesquisa Operacional (ENSSLIN et al., 2001). Estes métodos, além de indicarem a alternativa a ser escolhida, organizam o problema de forma a auxiliar na justificativa das escolhas. Em diversas situações, escolhas devem ser justificadas a autoridades, ao público ou mesmo aos superiores na hierarquia da empresa (KEENEY, 1982).

2.2.1. Abordagens Multicritério

De acordo com Roy apud Ensslin et al. (2001), os métodos multicritério podem ser classificados de acordo com a abordagem:

- abordagem de critério único de síntese;
- abordagem de subordinação de síntese;
- abordagem do julgamento local interativo.

Na abordagem de critério único de síntese, cada critério a ser considerado para determinada alternativa é avaliado independentemente dos demais. De posse dos valores associados a cada alternativa nos diversos critérios, é possível agregar as informações através de taxas de substituição (também chamadas de pesos) associadas a cada critério. Trabalha-se com uma função que agrega todos os valores referentes a uma alternativa, resultando em um único valor global, que poderá ser comparado com os valores globais calculados para as demais alternativas.

De acordo com Roy apud Ensslin (2001) e Mosheiov (2005), essa é a abordagem mais tradicional, denominada por Gomes et al. (2004) como escola americana. Nessa classificação enquadram-se modelos vastamente utilizados na prática, como o MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*) e o AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

Embora os métodos baseados na abordagem de critério único de síntese sejam bastante difundidos, antes de serem aplicados deve-se atentar para aspectos críticos dessa abordagem, como a determinação de funções de valor (ou utilidade) para cada critério e, principalmente, a determinação das taxas de substituição. Como os resultados do modelo estão fortemente baseados nestes parâmetros, pequenas modificações em seus valores podem gerar resultados totalmente diferentes (ENSSLIN et al., 2001). Além disso, Gomes et al. (2004) ressaltam que deve-se ter cuidado ao estudar as bases teóricas dessa abordagem, devido à força das hipóteses envolvidas.

Em oposição aos métodos da escola americana, Gomes et al. (2004) apontam métodos que, em seu conjunto, são denominados Escola Francesa de Apoio Multicritério à Decisão. Esses métodos admitem um modelo mais flexível do problema, pois não pressupõem, necessariamente, a comparação de alternativas e não impõem uma estruturação hierárquica do problema (GOMES et al., 2004).

A abordagem de subordinação de síntese aparece em contraposição à abordagem de critério único de síntese, defendendo que esta última consegue ordenar as alternativas apenas porque (VINCKE apud ENSSLIN et al., 2001):

- faz uso de pressupostos rígidos, utilizando funções de valor e somando os diversos valores (ponderados) para obtenção de um valor global;
- exige um nível elevado de informações dos decisores, além da estrutura de preferência (funções de valor e taxas de substituição).

Com isso, pode-se acabar gerando uma ordenação das alternativas mesmo quando a quantidade de informações disponíveis sobre elas não a justifique. Os resultados gerados pelos métodos de critério único de síntese são bastante ricos, porém pouco confiáveis (ENSSLIN et al., 2001).

A abordagem de subordinação de síntese evita propor hipóteses matemáticas excessivamente rígidas e perguntar questões excessivamente complexas aos decisores. Assim como na abordagem de critério único de síntese, a abordagem de subordinação de síntese também procura obter um valor global associado a cada uma das alternativas analisadas. No entanto, neste caso, procura-se chegar a este resultado através da comparação par-a-par das alternativas em cada um dos critérios considerados (ENSSLIN et al., 2001). Esta abordagem baseia-se na relação de subordinação entre cada par de alternativas, analisadas sob cada um dos aspectos considerados.

Introduz-se, nesta abordagem, o conceito de limiar. Segundo Roy apud Ensslin et al. (2001), é muito difícil para o decisor fornecer valores numéricos precisos sobre suas preferências. Geralmente, ele consegue determinar apenas uma faixa de valores. Existe, portanto, um limiar de indiferença em que duas alternativas podem ser julgadas equivalentes.

Embora apresente outra forma de encarar o problema dos métodos multicritério, a abordagem de subordinação de síntese mostra-se de difícil aplicação prática. As principais dificuldades envolvem a definição dos limiares e os procedimentos de agregação das comparações (ENSSLIN et al., 2001). Além disso, em problemas maiores, a comparação par-a-par pode tornar o processo exaustivo para os decisores.

A terceira abordagem, a abordagem do julgamento local interativo, diferentemente das duas anteriores, não busca obter um valor global referente a cada uma das alternativas. Nesta abordagem, parte-se da otimização de um determinado critério e a solução obtida é apresentada aos decisores. Estes, então, fornecem informações adicionais sobre suas preferências, visando melhorar outro critério, indicando a direção de otimização que ele

prefere. Isso permite a geração de outra solução matemática, e assim sucessivamente até que se chegue a uma solução satisfatória (ENSSLIN et al., 2001).

Embora possam ser gerados métodos bem fundamentados do ponto de vista teórico, existem poucas aplicações práticas para métodos com esta abordagem (GARDINER e VANDERPOOTEN apud ENSSLIN et al., 2001). Considera-se difícil trabalhar, de forma compreensível, com um número grande de critérios.

2.2.2. Escolha dos atributos

De acordo com Shtub et al. (1994), o grupo de atributos a ser utilizado para avaliar as alternativas deve atender aos seguintes requisitos:

- Totalidade: os atributos devem caracterizar todos os fatores a serem considerados no processo de decisão;
- Importância: todos os atributos considerados devem ter importância significativa, no sentido de serem potencialmente decisivos na escolha das alternativas que estiverem sendo julgadas;
- Mensurabilidade: cada atributo deve ter a capacidade de ser medido objetivamente ou subjetivamente, ou seja, deve ser possível estabelecer uma função utilidade a partir dos atributos escolhidos;
- Familiaridade: cada atributo deve ser familiar ao decisor de forma que ele possa identificar suas preferências em termos desses atributos;
- Não redundância: os atributos não devem ser redundantes entre si, pois nesse caso os atributos estariam medindo duas vezes um mesmo critério;
- Independência: o modelo de valores deve ser escolhido de tal forma que pequenas alterações no valor de um atributo não causem alteração nos valores dados a outros atributos.

2.2.3. MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*)

Uma vez que os atributos atendem aos requisitos listados, pode-se formular uma função matemática conhecida como Função Utilidade Multi-Atributo. A técnica de utilização de uma função utilidade que congrega os diversos atributos a serem analisados foi desenvolvida por Edwards e Newmann, na década de 80 (HANSEN, 2004).

Segundo Keeney (1981), a seleção de uma função utilidade adequada é crucial para a análise de múltiplos objetivos. Através dessa função, obtém-se um valor final para cada alternativa, composto a partir das avaliações da alternativa em relação a cada um dos atributos escolhidos.

Keeney (1982) salienta que essa orientação de “dividir e reunir” (referindo-se à avaliação de alternativas em relação a cada atributo, separadamente, e reunião das avaliações através da função utilidade) é essencial para o tratamento de problemas multicriteriais.

De acordo com Shtub et al. (1994), cada par de atributos deve ter relação de preferência e função utilidade independentes de seu complemento.

Por ordem de preferência independente do complemento entende-se que a relação de preferência associada a um par de atributos não depende dos níveis de preferência dos demais atributos (nem dos atributos em questão). Por exemplo, se estiverem sendo avaliados diversos carros, e julgar-se o atributo preço mais importante do que o atributo beleza. De acordo com a condição exposta, essa relação de importância deve se manter, independentemente dos valores associados a esses atributos e aos demais atributos escolhidos (potência do motor, por exemplo). Isso significa que o preço será sempre mais importante que a beleza, independente do carro ter uma alta ou baixa potência ou preço alto ou baixo.

A função utilidade, por sua vez, deve avaliar cada par de atributos independentemente dos níveis dos demais atributos. Uma alteração no valor da função utilidade como consequência de alteração dos níveis de dois atributos não deve ser afetada pelos níveis dos demais atributos.

A partir da escolha dos atributos, pode-se representar a função utilidade na sua forma aditiva:

$$U(x) = \sum_{i=1}^N k_i U_i(x_i) \quad (\text{Eq. 32})$$

Na função utilidade, $U(x)$ é o valor global associado à alternativa, k é o peso (também chamado de constante de escala) associado a cada atributo U_i e i é o índice correspondente a cada atributo. A partir dos valores de função utilidade calculados para cada uma das alternativas, pode-se identificar qual a melhor alternativa (será aquela com maior valor de função utilidade).

2.2.4. AHP (*Analytic Hierarchy Process*)

De acordo com Saaty (1986), a maioria das pessoas tem dificuldade para examinar mesmo poucos aspectos de um problema ao mesmo tempo. Dessa forma, torna-se necessário organizar os problemas em estruturas complexas que permitam analisar poucos aspectos de cada vez.

Com essa motivação, Saaty desenvolveu em 1980 o Processo de Análise Hierárquica (AHP – *Analytic Hierarchy Process*), um procedimento sistemático para representar os elementos de qualquer problema de decisão multicritério. O método é baseado na decomposição do problema em partes constituintes menores, que exigem apenas comparações par-a-par para a análise de prioridades em cada nível hierárquico (SAATY, 1986; SHTUB, 1994).

Os fatores comparados par-a-par podem ser, dependendo do contexto, alternativas, atributos ou critérios. As comparações entre os fatores são realizadas utilizando-se uma escala que indica a intensidade com que um determinado fator supera outro (em relação a um fator superior). Esse processo resulta em pesos ou valores para comparação de alternativas (SHTUB et al., 1994).

Nesse método, assim como no método MAUT, parte-se de um objetivo e escolhem-se os principais critérios que deverão ser avaliados. Estes critérios ficarão um nível abaixo do objetivo. Dependendo do nível de complexidade dos critérios selecionados, estes poderão ser decompostos em parâmetros que poderão ser estimados ou medidos. No nível mais baixo da hierarquia, aparecem as alternativas, que serão avaliadas em relação a todos os critérios estabelecidos. Uma vez estruturada a hierarquia, devem ser estabelecidas as prioridades para cada fator com respeito ao fator imediatamente acima na hierarquia. Esse procedimento é realizado a partir da comparação par-a-par dos fatores (SHTUB et al., 1994).

Para que essa metodologia seja válida, os seguintes axiomas devem ser atendidos (GOLDEN et al., 1989 apud SHTUB et al., 1994):

- A relação de preferência a_{ij} entre duas alternativas (ou critérios) i e j deve ser recíproca, ou seja,

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}; \quad (\text{Eq. 33})$$

- Ao julgar duas alternativas em relação a determinado critério, uma delas nunca poderá ser infinitamente superior à outra, ou seja,

$$a_{ij} \neq \infty; \quad (\text{Eq. 34})$$

- Deve ser possível formular o problema como uma hierarquia;
- Todos os critérios e alternativas que podem ter impacto no problema devem estar representados na hierarquia.

De acordo com Saaty (1986), uma escala de 1 a 9 pode ser utilizada para representar a intensidade das preferências do decisor em relação aos fatores comparados. Uma descrição desta escala está representada na tabela 1. De acordo com Shtub et al. (1994), os pesos derivados da utilização dessa escala podem ser interpretados como o grau em que uma alternativa é preferida frente à outra. No caso do método MAUT, por outro lado, os pesos têm apenas um significado qualitativo.

Tabela 1
Escala para comparações par-a-par

Valor	Definição
1	Mesma importância
3	Importância pequena de um fator sobre o outro
5	Importância grande ou essencial
7	Importância muito grande ou demonstrada
9	Importância absoluta
2,4,6,8	Valores intermediários

(Fonte: Saaty, 1991)

Beynon (2002) apresenta um estudo em que a escala original de 1 a 9 proposta por Saaty (1986) é questionada. O autor estuda outras 4 escalas propostas na literatura (todas

de 9 níveis) e compara as escalas analisando, principalmente, as distribuições de prioridades (representadas em histogramas) obtidas com a utilização de cada escala.

Ao final da comparação par-a-par dos fatores, as relações de preferência podem ser representadas em uma matriz de preferências $n \times n$, onde n é o número de fatores analisados. Por convenção, a matriz é sempre preenchida comparando-se o fator que aparece na coluna à esquerda em relação aos fatores que aparecem na linha superior (SAATY, 1991). Na figura 6 está representado um exemplo da construção da matriz de preferências para a análise de quatro fatores. Os elementos da diagonal principal são unitários, uma vez que consistem na comparação de cada fator com ele próprio. Os demais elementos da matriz devem ser preenchidos com base nos valores descritos na tabela 1 (SAATY, 1991).

	A	B	C	D
A	1	...	...	...
B	...	1	...	...
C	...	...	1	...
D	...	...	...	1

Figura 6: Matriz de comparações

Fonte: Saaty (1991)

Para obter os pesos de cada fator, resolve-se a seguinte equação:

$$A \cdot w = \lambda_{\max} \cdot w \quad (\text{Eq. 35})$$

onde A é a matriz de preferências e w é o autovetor associado ao maior autovalor λ_{\max} da matriz de preferências. O vetor w é ajustado de forma que a soma dos n pesos seja igual a 1.

Para verificar a consistência da matriz de preferências (matriz A), é sugerido por SAATY (1991) um índice de consistência:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (\text{Eq. 36})$$

onde n é o número de fatores escolhidos. O índice calculado é então comparado com um índice de referência. O índice randômico, representado na tabela 2 para matrizes de ordem 1 a 10, é definido por Saaty (1991) como o índice de consistência de uma matriz recíproca gerada randomicamente, baseada na escala de 1 a 9. O cálculo do índice de referência foi realizado por Saaty (1991) através de simulações, e os valores obtidos estão

apresentados na tabela 2. Na tabela 2, n representa a dimensão da matriz A e RI é o índice calculado a partir de uma amostra de 500 matrizes.

Tabela 2
Índices de referência para cálculo de consistência

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

(Fonte: Saaty, 1991)

Com base nesses valores, calcula-se a consistência da matriz A como:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (\text{Eq. 37})$$

De acordo com Saaty (1991) e Sthub et al. (1994), recomenda-se trabalhar sempre com índices de consistência inferiores a 0,1. Saaty apud Beynon (2002) sugere que o índice tenha valor aproximado de 0,1 ou menor, embora em alguns casos valores até 0,2 sejam aceitáveis.

Em seu estudo comparativo entre diferentes escalas, Beynon (2002) também analisa o número de matrizes consistentes que podem ser gerados com a utilização de cada escala.

O método AHP pode ser utilizado tanto para estabelecer pesos para avaliação de alternativas, quanto para escolha das alternativas. Nesse segundo caso, a matriz de preferências é elaborada comparando-se diretamente as alternativas (e não os critérios), par-a-par.

Dentre as principais vantagens oferecidas pelo método AHP, podem ser destacadas a facilidade de uso, especialmente quando se trata de um número reduzido de fatores, e a possibilidade de avaliação do nível de consistência das avaliações de preferências. Além disso, ficam claras as preferências do decisor, podendo ser identificados facilmente os aspectos mais importantes no processo decisório.

2.2.5. Funções de valor

Quando se trata de avaliar alternativas em um processo de análise multicritério, muitas vezes os decisores deparam-se com atributos que não podem ser medidos através de instrumentos tradicionais (SAATY, 2006).

Para avaliação de alternativas em relação a cada atributo definido, são utilizadas as chamadas funções de valor. As funções de valor são, segundo Ensslin et al. (2001), um instrumento para auxiliar os decisores a expressar, de forma numérica, suas preferências.

Segundo Saaty (2006), a avaliação de alternativas em relação a cada um dos critérios escolhidos pode ser realizada de duas formas: através de avaliação relativa ou absoluta. No caso da avaliação relativa, compara-se cada alternativa com todas as demais alternativas existentes. No caso da avaliação absoluta, compara-se cada alternativa com uma alternativa ideal (não necessariamente existente), processo também conhecido como pontuação de alternativas.

É interessante observar que as avaliações relativas são anteriores às absolutas, pois os ideais são criados com base em observações, a partir das quais forma-se um conceito do que deve ser o melhor (SAATY, 2006).

O método AHP, por exemplo, faz uso de comparações relativas para estabelecer valores para os fatores analisados. É interessante observar que, quando alternativas são comparadas em pares, elas se tornam estruturalmente dependentes. Isso significa que os valores obtidos para uma alternativa variam de acordo com o número e com a qualidade das demais alternativas existentes no problema (SAATY, 2006).

No caso de pontuação de alternativas (avaliação absoluta), os valores das alternativas não dependem das demais. O método de pontuação direta é, segundo Watson e Buede apud Ensslin et al. (2001), um dos métodos numéricos mais importantes, e amplamente utilizado, para a construção de funções de valor.

O método consiste em criar previamente um descritor formado por um conjunto de níveis de impacto, ordenados preferencialmente, devendo estar definidos o pior e o melhor nível. A esses dois níveis devem ser associados valores (geralmente, usa-se valores de 0 a 100). Com base nessa escala, os decisores são questionados a expressar numericamente a atratividade dos demais níveis em relação a esses valores extremos (ENSSLIN et al., 2001). Saaty (2006) também comenta que, para pontuar as alternativas em relação a um ideal, é necessário trabalhar-se com níveis de intensidade de qualidade de cada critério. Podem ser

utilizados, por exemplo, os níveis: excelente, acima da média, na média, abaixo da média e fraco.

Ensslin et al. (2001) observam que é interessante a construção de funções de valor mesmo quando os atributos poderiam ser avaliados em uma mesma unidade de medida (por exemplo, dinheiro). Variações idênticas em uma mesma grandeza podem gerar diferenças de atratividade diferentes e, portanto, é necessário quantificar de maneira adequada essas diferenças.

3. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

O presente capítulo descreve o processo produtivo da empresa escolhida. Trata-se de uma empresa que realiza serviços de construção de redes para telecomunicações.

Numa primeira etapa, é realizado um levantamento das principais características do processo produtivo da empresa. Nesta fase inicial, o principal objetivo é compreender a realidade da empresa, destacando os problemas identificados e os pontos críticos que devem ser tratados, do ponto de vista da programação de atividades. São explicitadas as atividades do processo, assim como as relações entre elas.

Posteriormente, são analisados os principais aspectos considerados relevantes para o seqüenciamento das atividades e é elaborada uma função objetivo que visa englobar os aspectos considerados. Na empresa em questão, assim como na maioria das empresas, busca-se não apenas obter uma programação de atividades possível de ser realizada, mas, principalmente, uma programação que otimize certos resultados.

A análise da empresa e o reconhecimento dos objetivos buscados pelo seqüenciamento servirão de base para a seleção de um método de programação da produção que possa ser aplicado a este caso. Com base na literatura consultada sobre o assunto, são escolhidos métodos que, após as adaptações necessárias, serão aplicados ao caso estudado.

3.1. Análise da empresa e do processo

Na primeira parte desta seção, são apresentadas as principais características da empresa escolhida, que atua na área de projeto e implantação de redes para

telecomunicações. Essas informações visam fornecer uma visão geral do contexto em que está inserido o processo a ser estudado, auxiliando a compreensão do assunto.

Em seguida, é apresentado o processo de projeto e implantação de redes da forma como ele é realizado atualmente, relacionando-o com os setores e equipes da empresa responsáveis pelas diferentes atividades identificadas no processo. A partir da análise desse processo são observadas possibilidades de melhoria, que serão discutidas no restante do trabalho.

3.1.1. A empresa

Neste trabalho, é analisada uma empresa prestadora de serviços de projeto e implantação de redes para telecomunicações em todo o Estado do Rio Grande do Sul. Trata-se do projeto e da construção física das redes, através da instalação de cabos metálicos e de fibra ótica e, inclusive, da instalação de alguns dos equipamentos necessários para o funcionamento dessas redes.

A empresa tem como cliente uma empresa de telecomunicações que, por sua vez, oferece aos seus clientes (usuários finais) os serviços de telecomunicações através desta rede. É interessante observar que empresa analisada atende exclusivamente este cliente. Trata-se de uma relação de parceria oficializada em contrato que estabelece exclusividade de ambos os lados, ou seja, assim como a empresa contratada atende apenas à cliente, esta também não poderá contratar outras empresas para o mesmo tipo de serviço.

Embora as duas empresas tenham essa relação de fidelidade, a empresa prestadora de serviços deve garantir o bom nível de atendimento dos pedidos, sob pena de pagar multas estipuladas no contrato.

Neste estudo estará sendo analisada unicamente a Coordenação de Projeto e Implantação da empresa, que é o setor responsável por todo o processo produtivo a ser analisado.

Conforme está representado na figura 7, a Coordenação de Projeto e Implantação está subdividida em três grandes coordenações, cada uma delas responsável por realizar os trabalhos de uma região do Estado. Em função da necessidade dos trabalhos serem realizados em diferentes localidades, a empresa optou por essa divisão em três coordenações visando diminuir as dificuldades decorrentes das distâncias a serem percorridas.

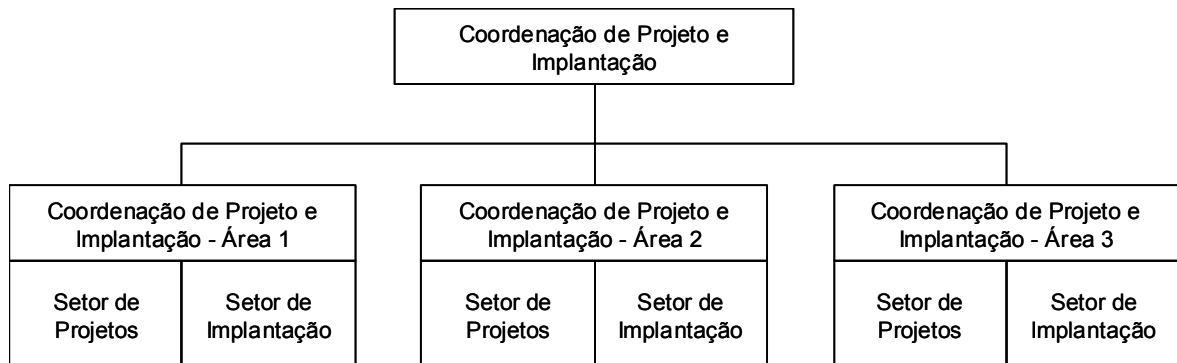


Figura 7: Estrutura da empresa

Fonte: elaborado pela autora

A Coordenação de Projeto e Implantação está situada em Porto Alegre, é o setor que interage diretamente com a empresa cliente. Este setor é responsável por distribuir, planejar e controlar as atividades dos setores subordinados a ele.

Fisicamente, cada uma das três coordenações tem uma sede no centro da sua área de atuação: uma das sedes está localizada em Porto Alegre, outra em Santa Maria e a terceira em Caxias do Sul.

Assim como a empresa estudada, diversas empresas escolhem essa forma de organização para garantir tempos de deslocamento menores. É o caso, por exemplo, de empresas que prestam atendimentos de emergência, empresas de tele-entrega ou empresas que expandem seus mercados através da instalação de filiais em outros Estados ou mesmo em outros países. As distâncias menores a serem percorridas permitem que as empresas ofereçam prazos menores para a execução dos serviços, além de reduzirem os custos de transporte.

Observando a figura 7, pode-se perceber que as três áreas têm setores equivalentes de projeto e implantação. Um trabalho designado para uma das áreas não necessita, em princípio, passar por nenhuma atividade de projeto ou implantação em outras áreas. Embora isso possa eventualmente ocorrer, não faz parte da seqüência normal de atividades previstas.

3.1.2. O processo

O processo a ser analisado está representado na figura 8. Nesta figura, podem ser identificadas as principais atividades envolvidas no fluxo de realização dos trabalhos.

O início do processo corresponde à chegada de um pedido. Cada pedido recebido está especificado em relação a uma série de itens. Entre outros, podem ser citados: o objetivo do projeto, o detalhamento técnico do projeto, o custo estimado, o local e o prazo.

Após o recebimento do pedido, a primeira atividade a ser realizada é uma análise inicial e o levantamento de dados básicos para a realização do trabalho. Esta etapa inicial é relativamente curta, e cabe às equipes que trabalham na Coordenação de Projeto e Implantação (deste ponto em diante, chamadas equipes de coordenação) da empresa, em Porto Alegre. Trata-se de uma análise preliminar, que culmina no envio do trabalho para uma das três áreas onde a empresa atua. De acordo com o local em que será realizada a implantação da rede (especificada no pedido), o trabalho é encaminhado para o setor de projetos da área correspondente.

As equipes de projeto são responsáveis pelas duas atividades executadas na seqüência: o levantamento de dados para o projeto e a elaboração do projeto. O levantamento de dados consiste no agrupamento de informações que são pesquisadas em cadastros, bancos de dados ou avaliadas em campo. Após a análise dessas informações, o projeto é elaborado e, na seqüência, é elaborado também um orçamento detalhado.

Terminada a elaboração do projeto e do orçamento, estes são encaminhados novamente às equipes de coordenação, para análise e aprovação.

Nesta etapa, as equipes de coordenação recebem os projetos das três áreas do Estado, analisam esses projetos e seus orçamentos. O orçamento é comparado com o orçamento estimado pela empresa cliente (recebido no momento do pedido) e, em caso de divergência significativa, a equipe entra em contato com a empresa cliente para que haja acordo sobre os valores.

Após a aprovação do projeto e do orçamento, este é repassado para as equipes de execução de obras. Novamente, as equipes estão divididas em três regiões. A equipe de execução da área correspondente é responsável por executar a obra e, posteriormente, elaborar um relatório das atividades realizadas. Este relatório será utilizado para atualização dos cadastros da rede de telecomunicações existente (esse processo de atualização dos cadastros não está considerado no fluxo, pois a empresa trata a atualização dos cadastros de forma independente do processo de projeto e implantação).

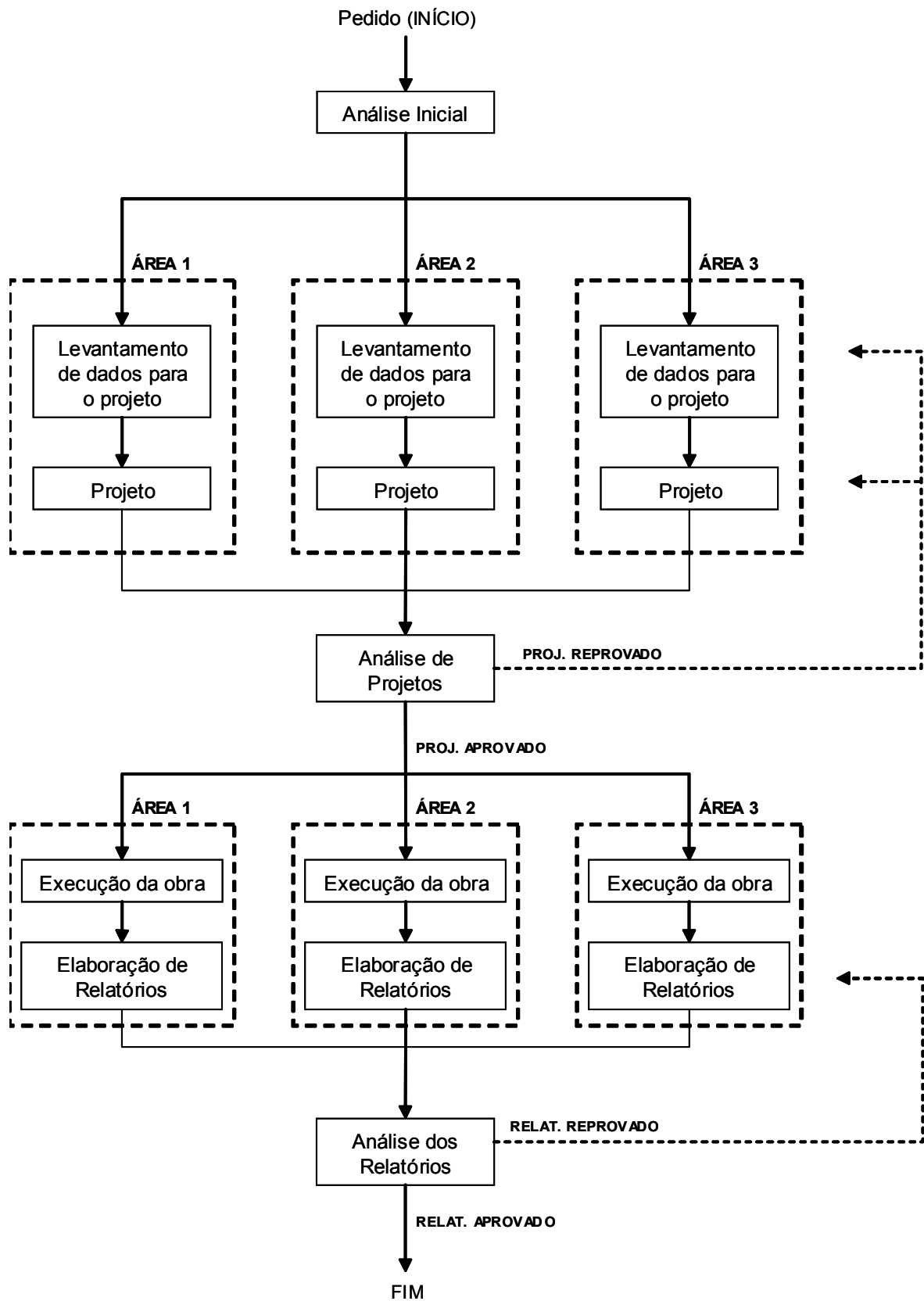


Figura 8: Fluxograma de atividades do processo

Fonte: elaborado pela autora

O relatório é encaminhado para as equipes de coordenação, que o analisam. Em caso de aprovação, o pedido é encerrado e considerado atendido.

Pode-se perceber que, tanto na etapa de análise do projeto, quanto na etapa de análise do relatório final, existe a possibilidade de não aprovação. No primeiro caso, em que o projeto não é aprovado, este pode ter de retornar à atividade de levantamento de dados ou à atividade de elaboração do projeto, dependendo dos problemas identificados no projeto. No caso da análise do relatório, em caso de não aprovação, o trabalho retorna à atividade de elaboração do relatório.

Pelo fato de a execução da obra ser geralmente supervisionada, é muito raro ocorrer algum erro de execução que não seja corrigido antes mesmo da conclusão da atividade. Os pequenos erros que ocorrem são corrigidos logo que detectados, de forma que, após a conclusão da obra, dificilmente há necessidade de retornar a esta etapa para corrigir ou complementar partes não executadas. Por este motivo e para simplificar o processo, essa possibilidade não está representada no fluxograma.

As possibilidades de reprovação de projeto e relatório estão representadas na figura 8 com setas pontilhadas.

Neste fluxograma, cada atividade está associada a um tipo de equipe. Para as atividades de projeto e execução de obras diferentes áreas estão associadas, respectivamente, equipes de projeto e implantação de cada coordenação.

As tarefas de análise inicial, análise de projetos e análise de relatórios ficam sob responsabilidade das equipes da coordenação. É importante salientar que essas equipes devem estar sempre conscientes das especificações dos pedidos, pois são responsáveis por garantir que os trabalhos executados pelas equipes de projeto e implantação estão de acordo com o solicitado pela empresa cliente.

Definidos a seqüência de atividades e os responsáveis por cada atividade, é necessário observar as particularidades do processo estudado e avaliar mais detalhadamente as relações entre as atividades explicitadas.

3.1.3. Análise do processo

A primeira observação sobre o processo, que o diferencia dos processos em linha comumente analisados, diz respeito à chegada dos pedidos. No caso estudado, os pedidos

não chegam em lotes e não existe um padrão conhecido para a ocorrência destes. Assim, só se adquire conhecimento do pedido no instante em que ele é recebido. Por serem pedidos altamente customizados, não é possível iniciar os trabalhos antes da sua chegada (o que equivaleria, no caso dos processos em linha, a formar estoques de produtos acabados ou mesmo de produtos intermediários). A empresa, portanto, só inicia qualquer atividade após a colocação do pedido. Isso torna o processo produtivo interessante do ponto de vista do seqüenciamento das atividades, já que torna ainda mais crítica a questão do atendimento dos prazos.

Devido a essa característica do processo, não caberia a aplicação de técnicas de previsão de demanda (*forecasting*) diretamente a este caso. Poderiam ser utilizadas estas técnicas para prever, por exemplo, volume de trabalho. Uma previsão desse tipo poderia ser útil para contratar e treinar novas equipes (antes mesmo de haver atrasos nos trabalhos) ou para planejar o aproveitamento das equipes em outras atividades, em períodos de menor quantidade de trabalho. Ainda assim, nenhum trabalho poderia ser iniciado sem que o pedido tenha sido recebido, com as devidas especificações.

De forma geral, os pedidos partem do setor de planejamento da empresa cliente (para o caso de projetos de caráter estratégico) ou do setor comercial (nos casos em que a demanda pelo serviço de telecomunicações já existe ou é bastante previsível). Após identificação da necessidade de realização de determinado trabalho, são feitas estimativas de custo para os projetos e especificados os detalhes do pedido antes que sejam enviados para a empresa em estudo. Nesse momento são acordados os prazos e valores aproximados para a execução do projeto e da obra.

Após a colocação do pedido, a primeira atividade do processo corresponde a uma análise preliminar, em que são estudadas as especificações do trabalho. Nesta fase, procura-se identificar as principais características do projeto e ocorre interação com a empresa cliente em caso de quaisquer dúvidas em relação às especificações.

As equipes de coordenação analisam as especificações dos pedidos, acrescentam informações, quando necessário, e distribuem os trabalhos para as equipes de projeto seguindo, principalmente, dois critérios: a localização das obras a serem executadas (nesta etapa, considera-se apenas a área, especificada no pedido) e a carga de trabalho das equipes. Busca-se, primeiramente, encaminhar o trabalho para qualquer equipe que trabalhe na área especificada no pedido. Dentre estas equipes, é escolhida aquela que estiver menos ocupada, ou seja, aquela que está ociosa ou a que ficará ociosa antes das outras. Pode-se, em alguns casos, designar projetos para equipes de outras áreas, mas apenas em situações muito especiais, que raramente ocorrem.

Normalmente, os trabalhos que são designados às equipes de projeto formam filas, que são tratadas pelas diferentes equipes de maneira não padronizada. De forma geral, todas as equipes procuram atender os trabalhos na seqüência em que chegam, respeitando o ordenamento da fila. No entanto, não há nenhuma orientação que impeça que as equipes escolham, dentre os trabalhos da fila, aqueles que elas preferirem. Em uma situação normal, as equipes podem priorizar os trabalhos da fila segundo suas próprias preferências, sem que para isso seja necessária uma justificativa.

As duas próximas atividades (levantamento de dados e projeto) são realizadas pelas equipes de projeto de cada área. Embora as duas tarefas sejam independentes, é recomendado, na empresa, que elas sejam realizadas pela mesma equipe, para minimizar o tempo total das duas tarefas. Verifica-se que, quando uma das equipes realiza a coleta de dados e outra elabora o projeto, esta equipe responsável pela elaboração do projeto necessita de mais tempo para o projeto do que a primeira necessitaria. Isto ocorre, principalmente, porque a equipe precisa se familiarizar com os dados relativos ao projeto antes de iniciar a elaboração deste. Pelo mesmo motivo, procura-se realizar o projeto assim que os dados forem coletados. Para representar esta restrição, optou-se por representar, neste estudo, as duas tarefas em conjunto, como se fossem uma única tarefa.

Outro fator a ser considerado é a possibilidade de ocorrerem interrupções na execução das tarefas. Em geral, as interrupções tornam a seqüência de atividades mais flexível, principalmente para o caso em que os pedidos podem chegar a qualquer instante, como é o caso em estudo.

Do ponto de vista estratégico, é sempre vantajoso permitir interrupções, pois elas não ocorrerão se não forem interessantes para o objetivo especificado (desde que o problema seja modelado de forma a incorporar nos cálculos os tempos de *setups* gerados por estas interrupções). Se isso ocorre, e se o método de seqüenciamento é escolhido de forma a considerar estes *setups*, a tendência é que as interrupções sejam minimizadas automaticamente, sendo escolhidas apenas nos casos em que as vantagens serão maiores do que as desvantagens.

Quando se considera a possibilidade de interrupção dos trabalhos, deve-se definir também se será permitido, ou não, que um trabalho seja terminado por outra equipe, diferente da que iniciou a execução.

Percebe-se, a partir destas considerações, que a simples análise dos tempos de cada atividade nem sempre é suficiente para deduzir qual o tempo total de duração de um trabalho. Podem ocorrer, por exemplo, interrupções, esperas entre as atividades e trocas de equipes durante a execução do trabalho. Todas essas possibilidades ocorrem, ou não, de

acordo com as restrições impostas pela empresa, de acordo com as características dos trabalhos que estão no sistema e de acordo com as características dos novos pedidos.

Na empresa estudada, as interrupções nos trabalhos ocorrem raramente e são bastante desencorajadas, sendo aceitas apenas em caso de emergências ou imprevistos. Pela característica dos trabalhos, principalmente no estágio de implantação (que pode envolver troca de postes, escavações, construção de canalização), não são recomendadas interrupções.

Terminada a elaboração do projeto, este é encaminhado novamente às equipes de coordenação. Nesta etapa, o projeto e o orçamento são analisados e podem ser aprovados ou não. Caso não sejam aprovados, o trabalho volta à etapa de levantamento de dados ou à etapa de elaboração do projeto, dependendo dos erros identificados.

Quando o projeto é aprovado, a equipe de coordenação repassa o trabalho para uma equipe de execução. Assim como na etapa de análise inicial, nesta etapa de aprovação do projeto, a equipe de coordenação deve repassar o projeto aprovado para as equipes de execução da área correspondente. Em alguns casos, pode-se escolher equipes de outras áreas.

Nesse estágio, também são observadas filas de trabalhos. Na maioria das vezes, cabe às equipes de implantação escolherem o próximo trabalho, assim que terminam uma atividade. Pelas diferentes características dos projetos, nem sempre a ordem dos trabalhos na fila é respeitada: projetos mais urgentes podem ultrapassar projetos menos urgentes, obras em localidades mais próximas da localidade onde está a equipe podem ser preferidas, etc. No entanto, percebe-se que nem sempre as equipes consideram os mesmos critérios para priorização dos trabalhos.

As etapas de implantação e elaboração de relatórios devem ser, obrigatoriamente, realizadas pela mesma equipe. Esta restrição, imposta pela empresa, tem como objetivo garantir que uma equipe fique responsável pela implantação de cada trabalho, o que evita erros que poderiam ser gerados pela falta de comunicação entre as equipes. As duas atividades estão representadas, neste estudo, como uma única atividade.

Um aspecto importante da etapa de implantação é o fato de ela ser realizada em diferentes locais do Estado, ou seja, quando uma equipe é designada para realizar uma obra, ela precisa viajar até o local especificado para realizar suas tarefas. Muitas vezes, estes tempos de deslocamento são significativos e, portanto, devem ser considerados não apenas no momento de designação das equipes, mas também para qualquer decisão a respeito de interrupções.

Outro ponto a ser ressaltado é que a etapa de implantação é notadamente a etapa mais longa do processo, para a grande maioria dos trabalhos. Sendo assim, seria natural concentrar a atenção na utilização dos recursos desta etapa.

Para que este tempo de deslocamento seja considerado no processo de distribuição das tarefas, é necessário que seja feita uma análise dos tempos de deslocamento entre os locais especificados nos trabalhos, para que estes tempos sejam considerados como tempos de *setup*. É importante salientar que estes tempos de *setup* dependem do local onde está a equipe e do local do próximo trabalho a ser executado pela mesma equipe. Seria interessante, por exemplo, que as equipes realizassem obras de uma mesma região (ou de regiões próximas) em seqüência.

Observa-se que, na empresa, não há um consenso sobre a forma de tratar esses tempos de deslocamento. Embora algumas equipes os considerem ao selecionar um novo trabalho, outras equipes os desconsideram, concentrando-se mais em outros critérios para a priorização dos trabalhos.

Após a execução da obra, são elaborados os relatórios. Estes relatórios são elaborados pela equipe de execução e, muitas vezes, consistem apenas na confirmação da execução das atividades previstas no projeto. Caso alguma atividade tenha sido realizada de forma diferente da prevista, essa informação deve ser registrada. Estes relatórios servirão de base para outras equipes, responsáveis pela atualização da planta de rede do Estado, atualizarem os cadastros.

Os relatórios são analisados pela equipe de coordenação, podendo ser aprovados ou não. Quando é reprovado, o trabalho volta à etapa de elaboração de relatórios. Tanto nesta etapa quanto na etapa de análise de projetos, identifica-se a possibilidade dos trabalhos terem de retornar para etapas anteriores, passando por atividades pelas quais os trabalhos já passaram.

Atualmente, observa-se que projetos ou relatórios reprovados são tratados como prioridade pelas equipes de projeto e implantação. Geralmente a parte do trabalho a ser refeita é pequena e, por isso, recomenda-se evitar manter esse retrabalho pendente. Em termos da atividade em si, também se considera ser mais fácil corrigir um trabalho feito recentemente do que um trabalho feito há mais tempo. Por esses motivos, esses trabalhos costumam ser atendidos logo que chegam a um setor pela segunda vez.

Um aspecto interessante do processo é que o trabalho passa três vezes pelo setor de coordenação, em três situações diferentes. Segundo Pinedo (1995), essa característica é denominada recirculação.

Embora o setor de coordenação não tenha um método definido para a ordem de análise dos trabalhos, observa-se que é feita uma distinção entre eles baseada no estágio em que se encontram. Quando existe fila de trabalhos a serem analisados, a maioria das equipes analisa primeiramente os relatórios de obras. Por ser a última etapa do processo, e pelo fato de muitos trabalhos serem concluídos pelas equipes de implantação já com atraso em relação ao prazo, esses trabalhos são considerados prioritários. Quando todos os relatórios de obras já foram analisados, as equipes de coordenação analisam os pedidos recebidos do cliente. Por ser uma etapa relativamente rápida, é priorizada frente à análise de projetos e orçamentos, mais complexa que as demais atividades das equipes de coordenação.

Diferentemente das demais equipes, as equipes de coordenação têm uma grande interação com o cliente. Muitas vezes, o cliente indica quais os trabalhos mais importantes, e esses são priorizados pelas equipes de coordenação. No entanto, nem sempre essas prioridades são informadas às demais equipes, que podem continuar priorizando os trabalhos segundo seus próprios critérios.

Com base nessas observações, percebe-se que não existe um planejamento de atividades definido na empresa estudada. A orientação das equipes é pouco clara, dando liberdade para que cada equipe utilize seu próprio critério de priorização. Embora algumas vezes as equipes de coordenação interfiram nessa priorização, indicando as urgências, na maioria das vezes as equipes atendem os trabalhos na ordem em que são recebidos ou baseiam-se apenas nos prazos para a determinação do próximo trabalho a ser executado.

Analisando o histórico de trabalhos da empresa, verifica-se que grande parte dos trabalhos é concluída em atraso em relação ao prazo inicial acordado entre as empresas. A conclusão de trabalhos em atraso gera inúmeros inconvenientes, dentre eles o pagamento de multas à empresa cliente. Essas multas, previstas em contrato, são proporcionais ao tempo de atraso.

Ainda que não exista concorrência explícita para a prestação do serviço, sem dúvida os atrasos são prejudiciais para a relação de parceria entre as empresas. Deve-se lembrar que o contrato de prestação de serviços tem prazo determinado. A cada nova negociação do contrato, esses atrasos são levados em consideração, assim como a qualidade dos serviços prestados, os preços, etc.

Para a empresa cliente, especialmente, os atrasos são indesejáveis por diversos motivos, dentre os quais pode-se citar:

- O atraso no término do trabalho pode atrasar a disponibilização do serviço ao cliente final, ou seja, corresponde a um período em que a rede a ser construída já poderia estar proporcionando retorno financeiro.
- Em alguns casos, os prazos de atendimento dos clientes finais estão acordados em contratos que podem prever multas caso o atendimento não seja disponibilizado no prazo.
- Além da questão financeira, atrasos na disponibilização dos serviços depreciam a imagem da empresa frente aos usuários e mesmo frente aos usuários em potencial, incentivando a busca por serviços de empresas concorrentes.

Um aspecto importante observado na empresa diz respeito ao cálculo das multas. De acordo com o contrato vigente, as multas não incorporam nenhuma diferenciação entre os trabalhos. Isso significa que, independente das características do trabalho atrasado, a multa é sempre calculada da mesma forma (levando em consideração apenas o prazo da obra e o número de dias de atraso). Esse procedimento não é estrategicamente interessante para a empresa cliente, pois não incentiva a empresa contratada a terminar primeiro os projetos mais urgentes.

A partir do exposto, percebe-se que uma adequada programação das atividades poderia trazer diversas melhorias ao processo. Além de proporcionar uma padronização no método de seqüenciamento, o que já representa uma melhoria, uma programação adequada pode levar em consideração aspectos que atualmente não estão sendo considerados e que são importantes para as empresas envolvidas. Nas próximas seções, será apresentada a modelagem proposta para esse processo produtivo.

3.2. Proposta para programação das atividades

Para que seja desenvolvido um método de programação de atividades para a empresa estudada, é fundamental que seja definido qual o resultado esperado, ou seja, qual o principal objetivo buscado.

Nesta seção, são identificados os aspectos considerados relevantes para a empresa, do ponto de vista da programação de atividades. Pretende-se compreender as prioridades da empresa cliente e traduzi-las de forma que possam ser incorporadas ao processo de seqüenciamento dos trabalhos.

3.2.1. Função objetivo

Com base na análise dos dados coletados, verificou-se que grande parte dos trabalhos é concluída após o prazo estipulado. Esses atrasos são prejudiciais tanto para a empresa responsável pela execução dos trabalhos, que paga multas proporcionais ao tempo de atraso, quanto para a empresa cliente, que depende da realização desses trabalhos para que possa oferecer serviços aos seus clientes. A partir dessa observação, optou-se por estudar a questão do atendimento dos prazos dos trabalhos.

Verificou-se, ainda, que o volume de trabalhos disponíveis para execução é bastante grande, de forma que nem sempre é possível o atendimento de todos os prazos. Sendo assim, torna-se interessante elaborar um método que oriente a programação de atividades, indicando quais, dos trabalhos disponíveis, devem ser priorizados. Considerando que necessariamente alguns trabalhos serão realizados em atraso, propõe-se um índice que indique quais trabalhos podem ser atrasados e quais devem ser realizados no prazo.

A partir dessas considerações, a função objetivo escolhida para esse estudo corresponde à minimização da soma dos atrasos ponderados:

$$\min \left(\sum_{j=1}^n w_j T_j \right) \quad (\text{Eq. 38})$$

Na equação 38, w_j é o peso associado ao trabalho j e T_j o atraso do trabalho (esse atraso tem valor zero quando o trabalho é concluído antes do prazo).

Propõe-se que pesos atribuídos a cada trabalho sejam definidos pela empresa cliente e informados às equipes de coordenação no momento da solicitação do trabalho. Dessa forma, a empresa estudada poderá utilizar esses pesos para orientar sua programação de atividades.

Esses pesos, calculados a partir de critérios que serão apresentados na seção 3.3, representam a importância da conclusão do trabalho no prazo estipulado. Não está sendo questionada a necessidade ou a importância da realização do trabalho, pois todos os trabalhos serão executados (no momento em que o pedido é encaminhado pela empresa cliente, a necessidade de realização do trabalho está definida). O peso w_j visa avaliar a necessidade de atendimento do prazo estipulado, ou seja, a partir da análise dos valores de w_j dos trabalhos podem ser identificados quais trabalhos são mais críticos em relação ao prazo. Esse conceito também não pode ser confundido com o conceito de urgência. A urgência de um trabalho estaria associada à necessidade de realização do trabalho no menor tempo possível.

Numa etapa posterior, esses pesos poderiam ser incorporados ao cálculo das multas, para incentivar ainda mais a empresa contratada a considerar os mesmos critérios escolhidos pela empresa cliente. Da forma como as multas são calculadas atualmente, os atrasos são contabilizados da mesma forma para todos os trabalhos, o que não reflete as diferenças existentes entre os trabalhos.

3.2.2. Estimativas de tempos

Para que a programação de atividades seja condizente com a realidade da empresa, e conhecendo as etapas do processo, é necessário calcular estimativas para a duração de cada atividade.

Atualmente, a empresa estudada utiliza estimativas de tempos para as atividades bastante simplificadas. Não existe uma forma padronizada de cálculo das estimativas.

Ao receberem os pedidos, as equipes de coordenação de projeto e implantação estimam os tempos necessários para cada uma das etapas com base nas informações que as equipes de projeto e implantação fornecem, que são, na maioria das vezes, bastante imprecisas.

Em geral, as equipes de projeto e implantação fazem estimativas baseadas no projeto, levando em consideração o tipo de serviço, o valor orçado (ou estimado), a localização da obra, entre outros aspectos. Equipes diferentes podem considerar aspectos diferentes, ou mesmo estimarem valores diferentes a partir dos mesmos dados, uma vez que essa estimativa não segue nenhuma regra pré-estabelecida.

Neste estudo, as durações das etapas são baseadas nos tempos de trabalhos já executados, ou seja, os tempos apresentados no estudo são os tempos reais de atividades já realizadas. Para o futuro, sugere-se a elaboração de um método para estimar previamente, com maior precisão, os tempos de processamento de cada etapa do processo. Uma estimativa mais apurada tende a enriquecer ainda mais a programação das atividades.

3.2.3. Análise dos *setups*

Neste estudo, a consideração dos *setups* é importante, pois, no estágio de execução de obras, verifica-se que os tempos de *setup* são da mesma ordem de grandeza de outras atividades do processo.

Para a modelagem do problema, será considerado que apenas a etapa de execução da obra tem *setup* significativo. O tempo de *setup* para esta atividade corresponde ao tempo necessário para o deslocamento da equipe até o local da obra. A desconsideração desse aspecto do problema para o estágio 4 implicaria na geração de uma programação de atividades impossível de ser realizada pelas equipes. Se os tempos referentes aos deslocamentos não fossem previstos na programação, eles apareceriam como atrasos das equipes em relação ao cronograma de atividades previsto. Para as demais atividades do processo, considera-se que o tempo de *setup* é insignificante, e está incluído no tempo da atividade.

No caso analisado, o tempo de *setup* da etapa de execução da obra depende tanto do próximo trabalho a ser executado por determinada equipe, quanto do trabalho anterior. Para que não seja necessário calcular os tempos de *setups* entre todos os pares de localidades dos trabalhos disponíveis, propõe-se, neste trabalho, que os *setups* sejam calculados com base nas regiões em que serão executados os trabalhos. A partir da divisão do Estado em três grandes áreas (conforme a divisão adotada pela empresa), é proposta uma subdivisão do Estado em 35 regiões. Dessa forma, os tempos de deslocamento entre as regiões podem ser representados através de uma matriz quadrada de ordem 35. A divisão do Estado em 35 regiões foi adaptada a partir da divisão apresentada pelo DAER (2006).

A tabela de *setups* proposta nesse trabalho está representada no apêndice A. Os tempos de *setup* estão apresentados em horas e foram estimados a partir das distâncias entre as localidades situadas no centro de cada região, considerando-se que o deslocamento das equipes é realizado de carro. A estimativa das distâncias (e, conseqüentemente, dos tempos de deslocamento) foi realizada a partir das distâncias entre municípios fornecidas pela ABCR (2006).

Por estar baseada nas distâncias entre as regiões, a matriz é simétrica. Considera-se, também, que o *setup* é nulo quando o deslocamento ocorre apenas dentro de uma região. Embora sempre seja necessário algum tempo de deslocamento, mesmo entre dois trabalhos na mesma região, esse tempo de deslocamento seria aproximadamente o mesmo

independente da região e também existiria sempre que se chegasse em uma outra região. Sendo assim, esse tempo está incluído no tempo da atividade, não será considerado *setup*.

3.3. Critérios para diferenciação dos trabalhos

Com base no contexto da empresa estudada, foram identificados cinco critérios a partir dos quais pode ser avaliado o grau de necessidade de conclusão do trabalho dentro do prazo. Neste estudo, esses critérios são utilizados como base para a diferenciação dos trabalhos, ou seja, servem como base para o cálculo dos pesos w_j .

Considerando que os critérios selecionados serão reunidos e expressos através de uma única variável w_j , pode-se dizer que essa pesquisa adota a abordagem de critério único de síntese para a análise multicriterial. Com base no estudo apresentado na revisão teórica do trabalho, optou-se por essa abordagem devido ao grande número de trabalhos que serão avaliados, o que tornaria a utilização das outras abordagens impraticável.

Os cinco critérios considerados relevantes para a elaboração do peso w_j podem ser resumidos como:

- retorno financeiro a curto prazo;
- retorno financeiro a longo prazo;
- obrigatoriedade;
- concorrência;
- urgência.

Esses critérios foram elaborados com base nas observações sobre o processo e com o auxílio de alguns colaboradores da empresa cliente. Os colaboradores escolhidos foram aqueles diretamente envolvidos no controle dos prazos dos trabalhos, e as conclusões foram obtidas por consenso em reuniões com os colaboradores. A seguir serão apresentadas as justificativas que levaram à escolha desses critérios.

Conforme já esperado, o retorno financeiro correspondente ao trabalho deve ser considerado, uma vez que os trabalhos que trazem maior retorno financeiro são, a partir de terminados, a fonte de renda da empresa cliente. A instalação de uma nova rede ou melhoria de uma rede existente em determinado local pode possibilitar a oferta de novos serviços de telecomunicações na região. Além disso, muitas vezes os trabalhos estão

associados à uma previsão de demanda (ou até a uma demanda já existente) que deve ser atendida assim que possível.

Em relação ao retorno financeiro esperado, optou-se por trabalhar com dois critérios distintos: um deles para avaliar o retorno a curto prazo e outro para avaliar o retorno a longo prazo. Na avaliação de dois trabalhos que trarão o mesmo retorno financeiro para a empresa cliente, é importante considerar se o retorno financeiro é esperado a curto ou longo prazo. Se o retorno financeiro for igual, deseja-se dar preferência ao trabalho com retorno previsto para curto prazo.

Muitas vezes, a demanda existente pelos serviços de telecomunicações deve ser atendida rapidamente também para evitar a interferência de empresas concorrentes. Um atraso na disponibilização de um serviço pode incentivar o cliente a entrar em contato com outras empresas. Especialmente nos casos em que estão envolvidos usuários que trazem bom retorno financeiro à empresa cliente (empresas de grande porte ou órgãos do governo, por exemplo), a concorrência na prestação de serviços de telecomunicações é bastante acirrada. Para avaliação desse critério, também pode ser considerada a região em que o trabalho será executado, visto que algumas regiões do Estado não são atendidas por empresas concorrentes.

Além dos trabalhos que são planejados pela empresa cliente em função de interesses próprios, como aqueles que visam o aumento de receita, alguns trabalhos são planejados visando satisfazer exigências do órgão regulatório do setor de telecomunicações. Atualmente, a concessão de permissões para a oferta de serviços de telecomunicações está condicionada ao atendimento de algumas exigências impostas pelo órgão regulador. Dentre essas exigências, podem ser destacadas, para a empresa cliente em questão: o atendimento de algumas áreas específicas do Estado, a garantia de universalização dos serviços, a política de preços, entre outras.

Para cumprir essas obrigações, muitas vezes é necessária a instalação de novas redes em diferentes locais do Estado. Após o prazo estipulado, essas redes são inspecionadas pelo órgão. Além de estarem previstas multas para os casos em que as exigências não são atendidas, deve-se ter em mente que estas exigências são condição para a autorização da oferta dos serviços. Por esse motivo, considera-se interessante indicar, com a utilização de um critério que indique obrigatoriedade, quais os trabalhos que têm esse caráter regulatório.

Por último, foi escolhido o critério de urgência do trabalho, principalmente para diferenciar obras de expansão de rede (planejadas para oferta de serviços futuros) e obras de manutenção, casos em que os clientes necessitam urgentemente da realização do

trabalho. Os trabalhos indicados como mais importantes em relação a esse critério correspondem aos casos em que existem clientes já está aguardando a reativação do serviço, ou casos em que foi prometida ao cliente uma data de instalação.

Com base nesses critérios, foi realizada uma análise de preferências para estabelecer o grau de importância relativo de cada critério. Nesta etapa, foi utilizado o método AHP para elaboração da matriz de preferências. Mais uma vez, a análise foi realizada com o auxílio de colaboradores da empresa cliente, e os valores representados na equação 39 (que representam as preferências dos colaboradores em relação aos critérios) foram obtidos por consenso.

A partir dos valores obtidos com essa análise, será elaborado um índice único (w_j) para que os trabalhos possam ser comparados entre si.

Na matriz de preferências, apresentada na equação 39, as linhas e colunas representam os critérios na mesma seqüência em que foram listados nesta seção: retorno a curto prazo, retorno a longo prazo, obrigatoriedade, concorrência e urgência.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 7 & \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} \\ \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{8} & \frac{1}{7} & \frac{1}{9} \\ \frac{6}{7} & 8 & 1 & 3 & 2 \\ 2 & 7 & \frac{1}{3} & 1 & 1 \\ 5 & 9 & \frac{1}{2} & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 39})$$

Para representação do grau de preferência entre os critérios, utilizou-se a escala de 1 a 9 proposta por Saaty (1991).

Para determinação dos pesos, analisa-se o maior autovalor associado a essa matriz ($\lambda_{max} = 5,334911$) e o autovetor correspondente:

$$w = \begin{bmatrix} 0,174966 \\ 0,051887 \\ 0,790819 \\ 0,335629 \\ 0,478176 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 40})$$

Associando os critérios aos valores calculados, são obtidos os pesos representados na tabela 3. Percebe-se que os critérios de obrigatoriedade, concorrência e urgência receberam pesos maiores que os critérios referentes ao retorno financeiro. Essa evidência

sugere que os aspectos em que existe o risco da perda do cliente ou do pagamento de multas são considerados mais críticos do que o retorno financeiro.

Tabela 3
Pesos para os critérios

Critério	Peso	Peso Normalizado
Retorno a curto prazo	0,174966	0,096
Retorno a longo prazo	0,051887	0,028
Obrigatoriedade	0,790819	0,432
Concorrência	0,335629	0,183
Urgência	0,478176	0,261

Nesse momento, pode ser calculado o índice de consistência recomendado por Saaty (1991). Para a matriz escolhida, de ordem $n = 5$, o valor de CI é:

$$CI = \frac{5,334911 - 5}{4} = 0,083727 \quad (\text{Eq. 41})$$

Com base da comparação com os valores de RI , calcula-se o índice de consistência relativo:

$$CR = \frac{0,083727}{1,12} = 0,074757 \quad (\text{Eq. 42})$$

Conforme comentado por Saaty (1991), o índice CR deve ter valores menores que 0,1, condição que está atendida nesse caso.

Definidos os critérios, os trabalhos podem ser avaliados em relação a cada um deles. Os valores serão reunidos através de uma função utilidade como a função apresentada na equação 43:

$$w_j = k_1 \cdot U_1(j) + k_2 \cdot U_2(j) + k_3 \cdot U_3(j) + k_4 \cdot U_4(j) + k_5 \cdot U_5(j) \quad (\text{Eq. 43})$$

Substituindo na equação 43 os pesos referentes a cada um dos critérios (representados na tabela 3), obtém-se:

$$w_j = 0,17 \cdot U_1(j) + 0,05 \cdot U_2(j) + 0,79 \cdot U_3(j) + 0,34 \cdot U_4(j) + 0,48 \cdot U_5(j) \quad (\text{Eq. 44})$$

Definida a função utilidade, propõe-se que a cada um desses critérios sejam atribuídos valores (U_1 , U_2 , U_3 , U_4 e U_5), pela empresa cliente, para cada trabalho. Com a substituição dos valores na função utilidade, têm-se como resultado o peso w_j

correspondente a cada trabalho. Sugere-se que a atribuição dos valores (e, conseqüentemente, do peso w_j de cada trabalho) seja realizada no momento em que o trabalho é encaminhado, pela empresa cliente, às equipes de coordenação.

Para avaliação dos critérios, propõe-se a utilização de uma escala de 0 a 9, em que podem ser fixados alguns valores, como forma de orientar o processo de avaliação. Os níveis propostos estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4
Níveis de referência para pontuação dos trabalhos

Nível	Significado
0	Não significativo
1	Mínimo
2,3,4	Níveis intermediários
5	Médio
6,7,8	Níveis intermediários
9	Grande

O método de pontuação direta foi escolhido como método de avaliação das alternativas principalmente em função do grande número de trabalhos que serão avaliados. Conforme exposto na revisão teórica desta pesquisa, a escolha de uma escala de avaliação absoluta torna a avaliação de cada trabalho independente da avaliação dos demais trabalhos. A escolha de uma forma de pontuação relativa exigiria que os trabalhos fossem comparados entre si, o que geraria um elevado número de comparações. Além disso, a cada novo trabalho incluído no sistema, todos os demais trabalhos teriam de ser reavaliados.

3.4. Métodos propostos para a programação das atividades

Nesta etapa, são propostos diferentes métodos para a programação de atividades na empresa estudada. Deste ponto em diante, as etapas do processo serão denominadas simplificada e da seguinte forma:

- estágio 1: análise preliminar;
- estágio 2: elaboração de projeto e orçamento;

- estágio 3: análise de projeto e orçamento;
- estágio 4: implantação e elaboração de relatório;
- estágio 5: análise de relatório.

A partir da observação do processo, percebeu-se que o estágio de implantação é o estágio crítico, responsável pela maioria dos atrasos nos trabalhos. Por esse motivo, será dada ênfase para o seqüenciamento das tarefas para as equipes de implantação (para as quais serão propostos 5 métodos de seqüenciamento), mantendo-se constantes as formas de programação de atividades propostas para as demais equipes.

Para as equipes de coordenação (4 equipes), propõe-se uma priorização de trabalhos baseada nos critérios já utilizados, mas padronizando-os para todas as equipes. O fluxo a ser executado para cada unidade de tempo (com base na análise da duração das atividades do processo, optou-se por trabalhar com unidade de tempo em horas) pelas equipes de coordenação está representado na figura 9.

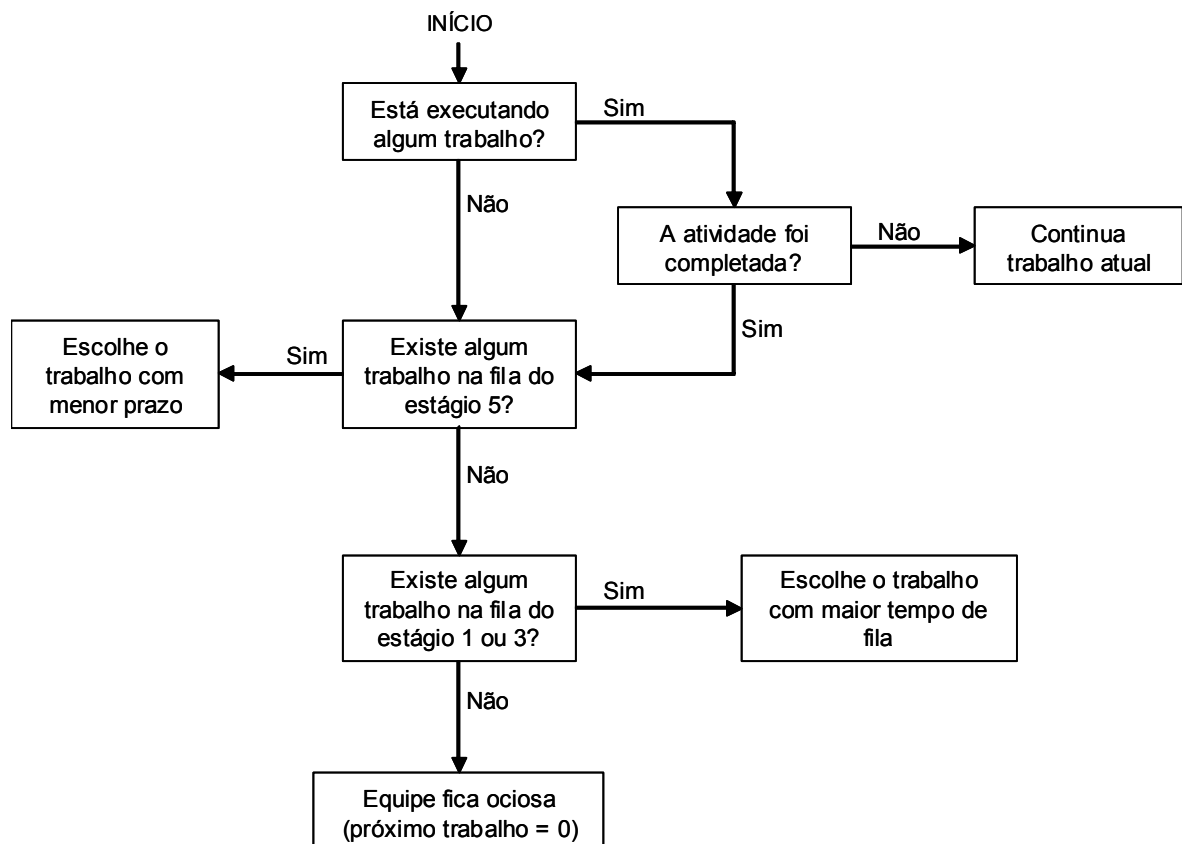


Figura 9: Priorização de trabalhos para equipes de coordenação

Fonte: elaborado pela autora

Conforme representado na figura 9, as equipes de coordenação não trabalham com interrupções e, portanto, a escolha de um novo trabalho acontece apenas quando a equipe termina o trabalho anterior.

Em uma primeira etapa, as equipes de coordenação verificam se existem relatórios de obras a serem analisados (indicado como estágio 5 no fluxograma). Conforme foi verificado na empresa, as equipes têm consciência de que esses trabalhos provavelmente estão atrasados ou com prazo quase esgotado. Sendo a análise de relatórios a última etapa, e relativamente curta, do processo, sugere-se priorizar esse estágio. Dentre os relatórios pendentes, são priorizados aqueles com menor prazo de conclusão.

Quando todos os relatórios que estavam disponíveis foram analisados, as equipes verificam as filas de trabalhos no estágio 1 (correspondente aos pedidos recebidos da empresa cliente) e no estágio 3 (correspondente aos projetos elaborados, que aguardam análise). Na análise das filas dos estágios 1 e 3, as equipes de coordenação priorizam os trabalhos em função da ordem de chegada no estágio (tempo de fila).

Observou-se que as equipes de coordenação em geral não acumulam grandes filas de trabalhos. Isso se justifica, em parte, pelo fato das atividades sob sua responsabilidade serem atividades relativamente curtas do processo. Além disso, o número de equipes de coordenação é relativamente grande, devido ao fato dessas equipes serem responsáveis, também, por atividades externas ao processo em estudo. Pelo fato de as equipes priorizarem as atividades do processo em análise frente às demais atividades sob sua responsabilidade, estas não estão sendo consideradas nesse estudo.

Para as equipes de projeto, propõe-se uma priorização com base no tempo de fila, ou seja, procurando-se respeitar a ordem de chegada dos pedidos. No estágio de projeto (estágio 2), é imposta a restrição em relação à área em que será executada a obra: as equipes de projeto de cada uma das áreas processam apenas os trabalhos da área correspondente. Na empresa estudada, existem duas equipes de projeto para cada área do Estado (cada Coordenação de Projeto e Implantação). A figura 10 apresenta o método de priorização dos trabalhos proposto para as equipes de projeto de cada área.

Para o seqüenciamento de trabalhos no estágio de implantação, serão analisados alguns métodos que oferecem regras de despacho simples e claras. As regras são propostas para que todas as equipes de implantação utilizem-nas como regra para a priorização dos trabalhos. Na empresa em questão, as equipes de implantação estão assim divididas: 5 equipes realizam trabalhos na área 1, 3 equipes na área 2 e outras 3 equipes na área 3.

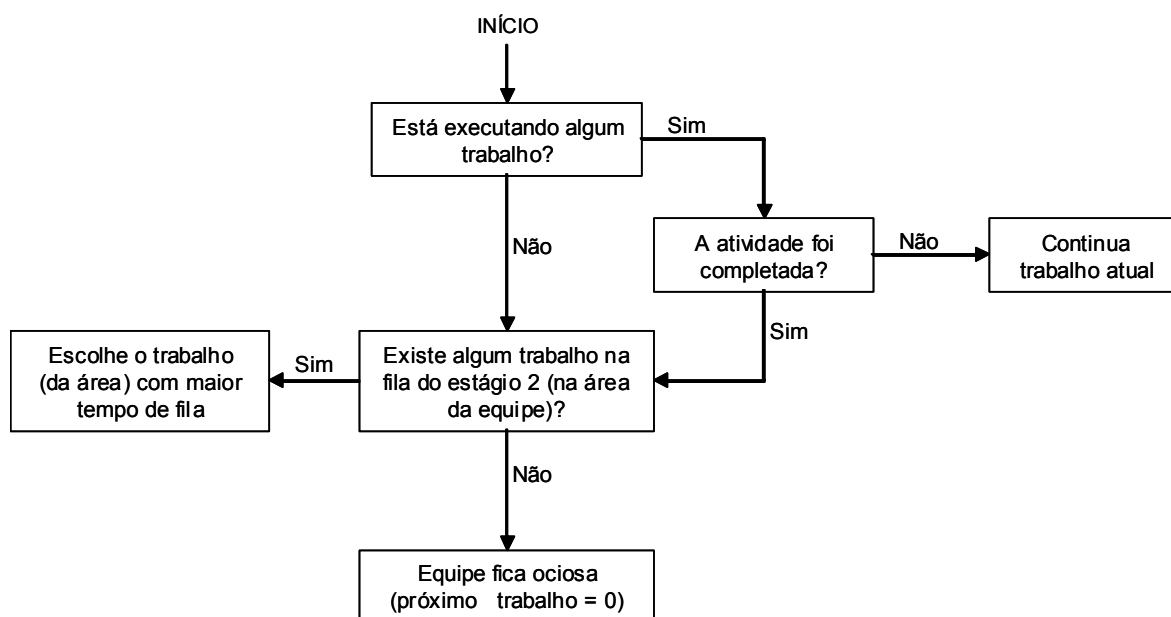


Figura 10: Priorização de trabalhos para equipes de projeto

Fonte: elaborado pela autora

Nesse estágio, é incorporada a possibilidade de cada equipe de implantação executar trabalhos pertencentes a qualquer área do Estado. Por ser um estágio crítico em termos de tempo de processamento, busca-se aproveitar ao máximo os recursos (equipes) disponíveis. Sendo assim, será definido que, sempre que uma equipe estiver ociosa, e apenas quando não houver nenhum trabalho na fila correspondente à sua área, a equipe poderá verificar as filas das outras áreas e escolher um dos trabalhos pendentes de atendimento. Embora a área 1 do Estado já possua um número maior de equipes de implantação, foram verificadas situações em que foram requisitadas equipes de outras áreas para atuação em trabalhos da área 1. Por esse motivo, optou-se por incorporar essa possibilidade aos métodos propostos.

O fluxograma para priorização de trabalhos no estágio de implantação está representado na figura 11.

No fluxograma, não está explicitada a regra para priorização dos trabalhos nas filas, pois trata-se de um fluxograma genérico que pode ser utilizado para representar qualquer um dos métodos de programação de atividades a serem propostos para a etapa de implantação.

Dentre os métodos estudados na revisão bibliográfica desta pesquisa, foram escolhidas cinco regras de despacho que se mostraram de fácil compreensão e que utilizam

conceitos pertinentes ao caso da empresa estudada. Optou-se pela utilização de regras de despacho em todos os estágios por dois motivos principais: é o método de seqüenciamento já utilizado na empresa atualmente e permite a consideração de novos trabalhos com facilidade. Além disso, o seqüenciamento é feito localmente, isto é, cada estágio do processo pode realizar o ordenamento dos trabalhos com base apenas nos trabalhos existentes na fila desse estágio. Basta que, cada vez que um trabalho seja concluído no estágio anterior, seja calculado o índice de priorização (I_j) correspondente a esse trabalho.

Segundo Pinedo (1995), a utilização de métodos de *branch and bound* para o problema da minimização dos atrasos ponderados não é recomendada, em função dos tempos proibitivos necessários para obtenção de resultados satisfatórios mesmo para problemas pequenos, com cerca de 20 trabalhos. Por esse motivo, as regras de despacho são recomendadas para esse tipo de problema.

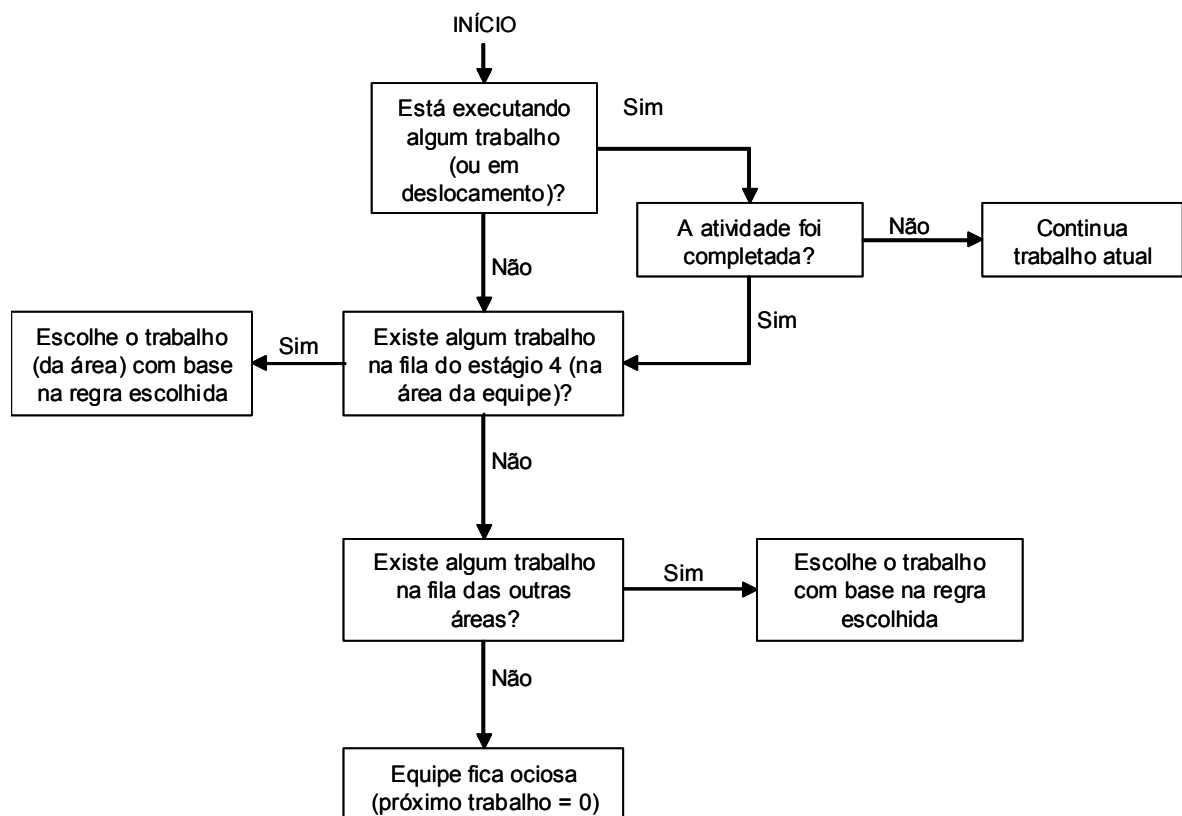


Figura 11: Priorização de trabalhos para equipes de implantação

Fonte: elaborado pela autora

Duas das regras escolhidas para esta pesquisa são baseadas em práticas já utilizadas na empresa: a priorização por prazo e a priorização por tempo de fila. Outra regra proposta é a utilização direta dos pesos elaborados pela empresa cliente. O quarto método proposto consiste em analisar as folgas dos trabalhos e, por último, propõe-se a utilização do índice ATC (VEPSALAINEN e MORTON, 1987), que considera as folgas, os tempos de processamento e os pesos dos trabalhos.

Nas próximas seções estão apresentados os métodos de seqüenciamento de atividades propostos para o estágio de implantação.

3.4.1. Método 1: Seqüenciamento baseado no prazo

O primeiro método proposto consiste no seqüenciamento dos trabalhos, no estágio de implantação, em função dos prazos para conclusão do trabalho. Atualmente, esse método é utilizado pela maioria das equipes de implantação e por esse motivo é interessante considerá-lo neste estudo.

Trata-se de uma regra de seqüenciamento simples, em que as equipes de implantação selecionam, dentre os trabalhos na fila, aquele com menor prazo para conclusão. O índice utilizado para priorização dos trabalhos pode ser representado por:

$$I_j = d_j \quad (\text{Eq. 45})$$

Como pode ser observado na equação 45, o índice de cada trabalho é constante ao longo de todo o período em que ele permanece no sistema (desde que é recebido pela empresa até sua conclusão).

Uma das vantagens do método consiste na facilidade de implementação, pois não é necessário desenvolver nenhum cálculo (o prazo é um dado do problema). O índice também não depende de estimativas (o que aconteceria caso ele considerasse, por exemplo, tempos de processamento ou tempos de *setup*), o que poderia gerar uma preocupação em relação à qualidade das estimativas.

Outra vantagem do método diz respeito à facilidade de compreensão do seu significado, por parte das equipes de implantação. Sendo um índice já conhecido e que representa claramente o prazo, não haveria dificuldade na utilização desse índice.

3.4.2. Método 2: Seqüenciamento baseado na prioridade

Para este método de seqüenciamento, sugere-se que as equipes de implantação selecionem o próximo trabalho dando prioridade aos trabalhos com maior peso w_j (calculado pela empresa cliente, a partir dos critérios definidos previamente).

Nesse método, o índice de prioridade dos trabalhos pode ser representado por:

$$I_j = w_j \quad (\text{Eq. 46})$$

Assim como no método anterior, trata-se de um índice que não depende do tempo, ou seja, o valor do índice de cada trabalho permanece sempre constante.

Embora seja desejável trabalhar com regras simples para priorização de trabalhos, a regra descrita na equação 46 parece simples demais para o caso estudado. Tomando apenas o peso do trabalho como critério para ordenamento, deixam de ser analisados aspectos críticos como, por exemplo, o prazo. Esse índice pode gerar um seqüenciamento em que trabalhos com prazos mais curtos e com pesos relativamente pequenos são concluídos em atraso enquanto trabalhos com pesos maiores são priorizados, mesmo que tenham prazos de conclusão mais longos.

Ainda assim, a priorização dos trabalhos com maior peso parece uma orientação aceitável, do ponto de vista das filas. Dependendo das características do processo e dos trabalhos, esse método poderia evitar que os trabalhos com maior peso permanecessem no sistema por muito tempo.

3.4.3. Método 3: Seqüenciamento baseado na fila

Mais uma alternativa proposta é a seleção dos trabalhos em função do tempo de fila, ou seja, respeitando a regra FIFO (*First In, First Out*). Embora não pareça ser uma regra muito interessante, considerando as características do problema, esta regra é utilizada por diversas equipes na empresa.

A priorização dos trabalhos segundo esse método pode ser descrita pela equação 47, em que os trabalhos são ordenados em ordem decrescente de I_j :

$$I_j(t) = t - TC_{(i-1)j} \quad (\text{Eq. 47})$$

O índice referente a cada trabalho j é calculado a partir do instante em que o trabalho foi concluído no estágio imediatamente anterior (no processo estudado, trata-se do estágio de aprovação do projeto). Assim, $TC_{(i-1)j}$ indica o instante em que o projeto foi aprovado, ou seja, o instante em que o trabalho se torna disponível para implantação. A partir de então, as equipes escolhem o trabalho que têm maior índice I_j , ou seja, que está há mais tempo na fila.

Considerando que o instante t é igual para todos os trabalhos (depende apenas do instante em que está sendo feita a escolha), pode-se representar a regra utilizando-se outro índice, independente do instante t :

$$I_j = TC_{j-1} \quad (\text{Eq. 48})$$

Nesse caso, analisa-se apenas o instante em que o trabalho ficou disponível para processamento, devendo ser escolhido para processamento o trabalho com menor índice I_j (ordenar os trabalhos em ordem crescente de I_j).

3.4.4. Método 4: Seqüenciamento baseado na folga

O quarto método proposto consiste no ordenamento dos trabalhos em função da folga. A regra de seqüenciamento considera, para elaboração do índice I_j , tanto o prazo quanto o tempo de processamento necessário e o instante atual. Segundo este critério, os trabalhos são escolhidos respeitando-se a ordem crescente do índice I_j :

$$I_j(t) = \max(d_j - p_j - t, 0) \quad (\text{Eq. 49})$$

Aos trabalhos que já não possuem folga, ou seja, trabalhos com $d_j - p_j - t$ menor que zero, é atribuído o valor zero como índice. Dessa forma, estes trabalhos são priorizados frente a qualquer trabalho que ainda possua folga. No entanto, pelo fato de todos os trabalhos sem folga receberem valor zero para o índice I_j , não existe mais ordenamento entre esses trabalhos. Em um ambiente em que muitos trabalhos atrasam, essa regra pode provocar a perda de diferenciação dos trabalhos.

3.4.5. Método 5: Seqüenciamento baseado na prioridade, prazo e folga

Finalmente, o último método proposto é o método desenvolvido por Vepsalainen e Morton (1987), denominado Custo Aparente do Atraso – ATC (*Apparent Tardiness Cost*). Segundo a regra elaborada pelos autores, os trabalhos são priorizados em função do seu peso (que, nesse estudo, será calculado a partir dos 5 critérios elaborados anteriormente), do tempo de processamento e do prazo para término do trabalho.

Segundo a regra proposta, as equipes selecionam o próximo trabalho dando prioridade aos trabalhos com maior ATC, calculado por Vepsalainen e Morton (1987) através do índice:

$$I_j(t) = \frac{w_j}{p_j} \exp\left(\frac{-\max(d_j - p_j - t, 0)}{k \cdot \bar{p}}\right) \quad (\text{Eq. 50})$$

Analisando a equação 50, percebe-se que o índice correspondente a cada projeto varia em função do tempo. Isso decorre da consideração da folga dos trabalhos.

Segundo Vepsalainen e Morton (1987), o parâmetro k depende do número de trabalhos concorrentes em uma fila, podendo variar entre 1,5 e 4,5, sendo que valores de k entre 2 e 3 são geralmente adequados. Na etapa de simulação desse método, são testados os valores 2, 3 e 4,5.

4. TESTE E DISCUSSÃO DOS MÉTODOS PROPOSTOS

Os cinco métodos foram testados através de simulação. Foram selecionados para dados de entrada da simulação 631 trabalhos realizados durante um período de tempo (passado) na empresa estudada. Por tratar-se de trabalhos já realizados, as estimativas para a duração das atividades foram calculadas com base em dados reais.

Na tabela 5 estão apresentados alguns dos trabalhos utilizados na simulação (a lista completa está apresentada no apêndice B). Os trabalhos estão numerados de 1 a 631. As colunas T1 a T5 trazem os tempos de processamento de cada trabalho em cada estágio. Os tempos iguais a zero correspondem a atividades já executadas (trabalhos realizados parcialmente, ou seja, trabalhos que, no instante inicial considerado nessa pesquisa, já estavam com as atividades referentes a alguns estágios concluídas). A coluna R_i indica o instante de tempo em que a solicitação do trabalho foi recebida pela equipe de coordenação (pedido), e D_i indica o prazo para conclusão.

Tabela 5
Lista de trabalhos para simulação (parcial)

Trabalho	T1	T2	T3	T4	T5	R_i	D_i	W_i	Área	Região
1	0	0	0	20	3	0	240	8,9718	2	5
2	0	0	0	10	1	0	240	5,7565	3	9
3	0	0	0	13	1	0	240	5,7565	3	17
244	1	9	1	14	2	64	560	4,0914	2	11
245	1	17	1	29	4	64	560	4,0914	1	1
246	1	11	1	10	1	80	328	6,1959	1	1
629	2	23	2	39	5	1632	2048	4,0914	3	22
630	1	18	1	30	4	1632	2048	4,0914	3	16
631	7	78	7	128	19	1656	2088	3,0278	1	1

Na coluna W_i estão propostos pesos para os trabalhos. Esses pesos foram calculados especialmente para o teste dos modelos, utilizando-se os critérios estabelecidos: retorno financeiro a curto e longo prazo, concorrência, obrigatoriedade e urgência.

É interessante salientar que a proposta, nessa pesquisa, é que os pesos sejam atribuídos aos trabalhos antes que eles sejam realizados (as equipes de coordenação devem receber essa informação junto com o pedido). No entanto, para o teste dos modelos, os pesos foram atribuídos após a conclusão de todos os trabalhos.

Finalmente, as duas últimas colunas da tabela informam a área e a região em que o trabalho deve ser realizado.

A partir das regras de despacho selecionadas, foi elaborado pela autora dessa pesquisa um programa em linguagem *Visual Basic* para ordenar os trabalhos de acordo com cada um dos métodos propostos. Esse programa gera, com base nos critérios escolhidos, a seqüência completa de atividades para cada um dos recursos, indicando especificamente em que instante cada tarefa deverá ser iniciada e terminada.

Nas próximas seções serão apresentados o algoritmo utilizado para o teste dos cinco métodos propostos e os resultados obtidos através da simulação. Esses resultados serão comparados visando identificar qual dos métodos propostos se mostra mais adequado ao caso estudado.

4.1. Algoritmo desenvolvido para simulação

Nesta seção são apresentados os passos definidos para o algoritmo desenvolvido pela autora. Primeiramente, são apresentados os passos correspondentes ao algoritmo utilizado para o teste do método 5, em que as equipes de implantação priorizam os trabalhos com base no índice ATC. No final da seção, são comentadas as diferenças existentes entre o algoritmo apresentado e o utilizado para o teste dos demais modelos propostos. O código completo do programa (para o método 5) pode ser verificado no apêndice C deste trabalho.

Os dados de entrada utilizados para o algoritmo são:

- número de equipes de cada tipo para cada área;
- matriz de *setups* (pode ser consultada no apêndice A deste trabalho);
- características dos trabalhos (apresentadas no apêndice B deste trabalho, no mesmo modelo da tabela 5);
- horizonte escolhido para a programação (t_f).

Com base nessas informações, o algoritmo visa propor uma programação de atividades para todas as equipes, até o instante $t = t_r$. Neste estudo, a unidade de tempo t é medida em horas.

Os primeiros passos do algoritmo correspondem à análise dos trabalhos, para que seja definido em qual estágio (ou em qual fila) cada trabalho está.

Passo 1: Selecionar o primeiro trabalho da lista de dados de entrada (apresentada parcialmente na tabela 5).

Passo 2: Verificar se o trabalho está disponível para processamento. Os trabalhos disponíveis para processamento são aqueles que já foram solicitados pela empresa cliente ($R_i < t$), mas ainda não foram concluídos.

Passo 3: Se o trabalho estiver disponível, verificar qual o próximo estágio em que ele deverá ser processado. Se não estiver disponível, ir para o passo 5.

Passo 4: Se o próximo estágio do trabalho é o estágio 4, calcular o índice de prioridade do trabalho para esse estágio, o índice ATC:

$$I_j(t) = \frac{w_j}{p_j} \exp\left(\frac{-\max(d_j - p_j - t, 0)}{k \cdot \bar{p}}\right) \quad (\text{Eq. 51})$$

No primeiro ciclo, o peso w_j , o tempo de processamento p_j e o prazo d_j correspondem aos valores informados na tabela de dados de entrada (conforme representado na tabela 5). Nos ciclos posteriores, o valor do tempo de processamento p_j corresponde ao tempo restante necessário para conclusão da atividade (os tempos de processamento são atualizados no passo 35 do algoritmo).

Passo 5: Verificar se existem mais trabalhos na lista. Nesse caso, selecionar o próximo trabalho e volta ao passo 2. Se toda a lista de trabalhos já foi analisada, seguir para o passo 6.

Após a definição dos estágios em que se encontram os trabalhos, inicia-se a elaboração da programação das atividades. Os passos 7 a 14 correspondem à programação de atividades para as equipes de coordenação. Os passos 15 a 20 correspondem à programação de atividades para as equipes de projeto. Os passos 21 a 32 correspondem à programação de atividades para as equipes de implantação.

Passo 6: Preencher na tabela de programação de atividades o instante de tempo atual (t).

Passo 7: Selecionar a primeira equipe de coordenação.

Passo 8: Verificar se a equipe está realizando algum trabalho, isto é, se na tabela de programação de atividades existe algum trabalho previsto para $t-1$. Caso positivo, ir para o passo 9. Caso negativo, ir para o passo 12.

Passo 9: Verificar se o trabalho que a equipe estava realizando foi concluído. Nesse caso, ir para o passo 10. Se o trabalho ainda não foi concluído, a equipe deverá continuar processando este trabalho, ir para o passo 13.

Passo 10: Verificar se atividade concluída pela equipe era uma atividade do estágio 5 (análise de relatórios). Nesse caso, ir para o passo 11. Caso contrário, ir para o passo 12.

Passo 11: Registrar o instante em que o trabalho foi terminado (t) na tabela de análise de atrasos (representada parcialmente na tabela 9, na seção 4.2 deste trabalho). O instante t deve ser registrado na terceira coluna (*Térm.*).

Passo 12: Escolher o próximo trabalho a ser executado pela equipe, utilizando a função *Equipe1*.

Passo 13: Escrever na tabela de programação de atividades o número do trabalho selecionado para a equipe, na coluna correspondente à equipe e na linha correspondente ao instante atual (t).

Passo 14: Selecionar a próxima equipe de coordenação e voltar ao passo 8. Se todas as equipes de coordenação já foram analisadas, seguir para o passo 15.

Passo 15: Selecionar a primeira equipe de projeto.

Passo 16: Verificar se a equipe está realizando algum trabalho, isto é, se na tabela de programação de atividades existe algum trabalho previsto para $t-1$. Caso positivo, ir para o passo 17. Caso negativo, ir para o passo 18.

Passo 17: Verificar se o trabalho que a equipe estava realizando foi concluído. Nesse caso, ir para o passo 18. Se o trabalho ainda não foi concluído, a equipe deverá continuar processando este trabalho, ir para o passo 19.

Passo 18: Escolher o próximo trabalho a ser executado pela equipe, utilizando a função *Equipe2*.

Passo 19: Escrever na tabela de programação de atividades o número do trabalho selecionado para a equipe, na coluna correspondente à equipe e na linha correspondente ao instante atual (t).

Passo 20: Selecionar a próxima equipe de projeto e voltar ao passo 16. Se todas as equipes de projeto já foram analisadas, seguir para o passo 21.

Passo 21: Selecionar a primeira equipe de implantação.

Passo 22: Verificar se a equipe está realizando alguma tarefa, isto é, se na tabela de programação de atividades existe alguma tarefa prevista para $t-1$. No caso das equipes de implantação, a tarefa em $t-1$ pode ser um trabalho (indicado pelo número do trabalho) ou uma atividade de *setup* (os *setups* correspondem a deslocamentos entre localidades, estão indicados na tabela de programação de atividades com a letra “S”). Caso a equipe esteja realizando um trabalho, ir para o passo 23. Caso a equipe esteja se deslocando (em *setup*), ir para o passo 24. Caso a equipe não esteja executando tarefas em $t-1$, ir para o passo 25.

Passo 23: Verificar se o trabalho que a equipe estava realizando foi concluído. Nesse caso, ir para o passo 25. Se o trabalho ainda não foi concluído, a equipe deverá continuar processando este trabalho, ir para o passo 26.

Passo 24: Verificar se o deslocamento (*setup*) necessário já foi concluído. Nesse caso, a equipe deverá executar o trabalho para o qual ela estava realizando o *setup*. Caso o *setup* ainda não esteja concluído, a equipe deverá continuar em *setup*. Ir para o passo 26.

Passo 25: Escolher o próximo trabalho a ser executado pela equipe, utilizando a função *Equipe4*.

Passo 26: Escrever na tabela de programação de atividades o número do trabalho (ou “S”, no caso de *setup*) selecionado para a equipe, na coluna correspondente à equipe e na linha correspondente ao instante atual (t).

Passo 27: Selecionar a próxima equipe de implantação e voltar ao passo 22. Se todas as equipes de implantação já foram analisadas, seguir para o passo 28.

Passo 28: Selecionar a primeira equipe de implantação.

Passo 29: Verificar se a equipe de implantação ficará ociosa. Essa verificação é realizada através de consulta à tabela de programação de atividades, para o instante t . As equipes ociosas estão com trabalho igual a zero na tabela. Nesse caso, ir para o passo 30. Caso a equipe esteja com um trabalho (ou *setup*) programado para o instante t , ir para o passo 32.

Passo 30: Escolher o próximo trabalho a ser executado pela equipe, utilizando a função *Equipe4-final*.

Passo 31: Escrever na tabela de programação de atividades o número do trabalho selecionado para a equipe, na coluna correspondente à equipe e na linha correspondente ao instante atual (t).

Passo 32: Selecionar a próxima equipe de implantação e voltar ao passo 29. Se todas as equipes de implantação já foram analisadas, seguir para o passo 33.

Passo 33: Neste ponto, todas as equipes já estão com as atividades programadas. Avançar a variável de tempo (somar 1 à variável t).

Passo 34: Atualizar os tempos de fila dos trabalhos (somar 1).

Passo 35: para os trabalhos escolhidos para execução neste ciclo, atualizar o tempo de processamento restante (diminuir 1).

Passo 36: Verificar se t é igual ao tempo final t_f (definido como o horizonte de programação). Nesse caso, seguir para o passo 37. Caso $t < t_f$, retornar ao passo 1 e reiniciar o ciclo.

Passo 37: Verificar se algum trabalho foi concluído neste último ciclo e anotar o instante de término na tabela de análise de atrasos (seguindo o mesmo padrão do passo 11 do algoritmo).

Passo 38: Fim.

A seguir são apresentadas as funções *Equipe1*, *Equipe2*, *Equipe4* e *Equipe4-final*, que são chamadas nos passos 12, 18, 25 e 30, respectivamente. Essas funções correspondem às regras de priorização escolhidas para cada tipo de equipe.

A função *Equipe1* corresponde à regra de priorização de trabalhos escolhida para as equipes de coordenação (responsáveis pelos estágios 1, 3 e 5 do processo). As equipes de coordenação devem escolher os trabalhos analisando, primeiramente, o estágio 5. Nesse estágio, os trabalhos são priorizados em ordem crescente de prazo. Quando não houverem trabalhos na fila do estágio 5, então as equipes devem escolher trabalhos dos estágios 1 e 3, respeitando a ordem de chegada dos trabalhos nas filas. A seguir estão apresentados os passos referentes à função *Equipe1*.

Passo 1: Definir a variável *prior* e associar a ela um valor relativamente alto (por exemplo, 9999). Esse valor será, nos passos subseqüentes, comparado aos prazos dos trabalhos.

Passo 2: Definir a variável *trab* e associar a ela o valor zero. Ao final da função *Equipe1*, essa variável indica qual o trabalho selecionado. Selecionar o primeiro trabalho da lista de dados de entrada.

Passo 3: Se o trabalho estiver disponível para processamento e aguardando na fila do estágio 5, ir para o passo 4. Caso contrário, ir para o passo 6.

Passo 4: Verificar o prazo do trabalho. Se o prazo for menor do que o valor da variável *prior*, ir para o passo 5. Caso contrário (prazo maior ou igual ao valor de *prior*), ir para o passo 6.

Passo 5: Verificar se o trabalho selecionado está escolhido (ou mesmo sendo executado) por alguma outra equipe de coordenação. Para isso, basta verificar, na tabela de programação de atividades, se o trabalho está previsto para alguma equipe de coordenação nos instantes t ou $t-1$. Caso este trabalho já esteja designado para outra equipe, ir para o passo 6. Caso contrário, selecionar temporariamente esse trabalho (associar o número do trabalho à variável *trab*) e atribuir o valor do prazo correspondente à variável *prior*. Ir para o passo 6.

Passo 6: Selecionar o próximo trabalho da lista de dados de entrada, ir para o passo 3. Caso todos os trabalhos já tenham sido analisados, seguir para o passo 7.

Passo 7: Analisar o valor da variável *trab*. Se a variável tiver valor zero, ir para o passo 8. Se a variável tiver valor maior que zero (isso significa que existe um trabalho selecionado), ir para o passo 13.

Passo 8: Selecionar o primeiro trabalho na lista de dados de entrada. Atribuir à variável *prior* o valor -1. Nos passos subseqüentes, essa variável será utilizada para comparação com os tempos de fila dos trabalhos.

Passo 9: Se o trabalho estiver disponível para processamento e aguardando na fila dos estágios 1 ou 3, ir para o passo 10. Caso contrário, ir para o passo 12.

Passo 10: Verificar o tempo de fila do trabalho. Se o tempo de fila for maior do que o valor da variável *prior*, ir para o passo 11. Caso contrário (tempo de fila menor ou igual à variável *prior*), ir para o passo 12.

Passo 11: Verificar se o trabalho selecionado está escolhido (ou mesmo sendo executado) por alguma outra equipe de coordenação. Para isso, basta verificar, na tabela de programação de atividades, se o trabalho está previsto para alguma equipe de coordenação nos instantes t ou $t-1$. Caso este trabalho já esteja designado para outra equipe, ir para o passo 12. Caso contrário, selecionar temporariamente esse trabalho (associar o número do trabalho à variável *trab*) e atribuir o valor do tempo de fila correspondente à variável *prior*. Ir para o passo 12.

Passo 12: Selecionar o próximo trabalho da lista de dados de entrada, ir para o passo 9. Caso todos os trabalhos já tenham sido analisados, seguir para o passo 13.

Passo 13: Esse passo corresponde ao final da função *Equipe1*. O valor atual da variável *trab* indica o trabalho que deverá ser executado pela equipe que está sendo analisada. Se o valor associado à variável *trab* for zero, isso significa que a equipe deverá permanecer ociosa.

A função *Equipe2* corresponde à regra de priorização de trabalhos escolhida para as equipes de projeto (estágio 2 do processo). As equipes de projeto devem escolher os trabalhos respeitando a ordem de chegada dos trabalhos na fila. A seguir estão apresentados os passos referentes à função *Equipe2*.

Passo 1: Definir a variável *prior* e associar a ela o valor -1. Esse valor será, nos passos subseqüentes, comparado ao tempo de fila dos trabalhos.

Passo 2: Definir a variável *trab* e associar a ela o valor zero. Ao final da função *Equipe2*, essa variável indica qual o trabalho selecionado. Selecionar o primeiro trabalho da lista de dados de entrada.

Passo 3: Analisar se a área do trabalho corresponde à área da equipe que está sendo analisada. Se o trabalho for de área diferente da área da equipe, ir para o passo 7 (equipes de projeto analisam apenas trabalhos da sua área).

Passo 4: Se o trabalho estiver disponível para processamento e aguardando na fila do estágio 2, ir para o passo 5. Caso contrário, ir para o passo 7.

Passo 5: Verificar o tempo de fila do trabalho. Se o tempo de fila for maior do que o valor da variável *prior*, ir para o passo 6. Caso contrário (tempo de fila menor ou igual ao valor de *prior*), ir para o passo 7.

Passo 6: Verificar se o trabalho selecionado está escolhido (ou mesmo sendo executado) por alguma outra equipe de projeto. Para isso, basta verificar, na tabela de programação de atividades, se o trabalho está previsto para alguma equipe de coordenação nos instantes t ou $t-1$. Caso este trabalho já esteja designado para outra equipe, ir para o passo 7. Caso contrário, selecionar temporariamente esse trabalho (associar o número do trabalho à variável *trab*) e atribuir o valor do tempo de fila correspondente à variável *prior*. Ir para o passo 7.

Passo 7: Selecionar o próximo trabalho da lista de dados de entrada, ir para o passo 3. Caso todos os trabalhos já tenham sido analisados, seguir para o passo 8.

Passo 8: Esse passo corresponde ao final da função *Equipe2*. O valor atual da variável *trab* indica o trabalho que deverá ser executado pela equipe que está sendo analisada. Se o valor associado à variável *trab* for zero, isso significa que a equipe deverá permanecer ociosa.

As funções *Equipe4* e *Equipe4-final* correspondem à regra de priorização de trabalhos escolhida para as equipes de implantação (estágio 4 do processo). As equipes de implantação devem escolher os trabalhos respeitando a ordem decrescente do índice de priorização dos trabalhos (ATC), calculado no passo 4 do algoritmo proposto. Numa primeira

fase, a atribuição dos trabalhos às equipes de implantação é realizada segundo a função *Equipe4* (que é chamada no passo 25 do algoritmo). Nessa função, as equipes escolhem apenas trabalhos da área correspondente, por exemplo, equipes da área 1 escolhem apenas trabalhos da área 1. A função *Equipe4-final* (chamada no passo 30 do algoritmo) visa escolher trabalhos para as equipes de implantação que, após a programação de atividades com a função *Equipe4*, foram programadas para ficarem ociosas no instante t . A função *Equipe4-final* utiliza a mesma regra de priorização da função *Equipe4*, porém não faz restrição em relação à área do trabalho, isto é, as equipes poderão escolher trabalhos de qualquer área do Estado. Sendo assim, os passos da função *Equipe4-final* são exatamente os mesmos passos da função *Equipe4*, com exceção do passo 3, que não deve ser executado na função *Equipe4-final*.

A seguir estão apresentados os passos referentes à função *Equipe4*.

Passo 1: Definir a variável *prior* e associar a ela o valor -1. Esse valor será, nos passos subsequentes, comparado ao índice de priorização dos trabalhos (ATC).

Passo 2: Definir a variável *trab* e associar a ela o valor zero. Ao final da função *Equipe4*, essa variável indica qual o trabalho selecionado. Selecionar o primeiro trabalho da lista de dados de entrada.

Passo 3: Analisar se a área do trabalho corresponde à área da equipe que está sendo analisada. Se o trabalho for de área diferente da área da equipe, ir para o passo 7 (as equipes de implantação dão preferência aos trabalhos da área correspondente).

Passo 4: Se o trabalho estiver disponível para processamento e aguardando na fila do estágio 4, ir para o passo 5. Caso contrário, ir para o passo 7.

Passo 5: Verificar o valor do índice de priorização do trabalho. Se o valor do índice for maior do que o valor da variável *prior*, ir para o passo 6. Caso contrário (índice menor ou igual ao valor de *prior*), ir para o passo 7.

Passo 6: Verificar se o trabalho selecionado está escolhido (ou mesmo sendo executado) por alguma outra equipe de projeto. Para isso, basta verificar, na tabela de programação de atividades, se o trabalho está previsto para alguma equipe de coordenação nos instantes t ou $t-1$. Caso este trabalho já esteja designado para outra equipe, ir para o passo 7. Caso contrário, selecionar temporariamente esse trabalho (associar o número do trabalho à variável *trab*) e atribuir o valor do índice correspondente à variável *prior*. Ir para o passo 7.

Passo 7: Selecionar o próximo trabalho da lista de dados de entrada, ir para o passo 3. Caso todos os trabalhos já tenham sido analisados, seguir para o passo 8.

Passo 8: Analisar o valor atual da variável *trab*. Se o valor associado à variável *trab* for zero, isso significa que a equipe deverá permanecer ociosa, ir para o passo 11. Caso algum trabalho tenha sido selecionado (variável *trab* diferente de zero), ir para o passo 9.

Passo 9: Analisar o tempo necessário para que a equipe se desloque até a região do trabalho escolhido, partindo da região atual da equipe. Se o tempo de *setup* for zero, ir para o passo 11. Se o *setup* for maior que zero, associar a letra “S” à variável *trab* e ir para o passo 10.

Passo 10: Nesse caso, a tarefa selecionada para a equipe é uma tarefa de *setup* (indicada como “S”). Será associada à equipe o tempo de *setup* necessário e o próximo trabalho a ser executado após o *setup*.

Passo 11: Esse passo corresponde ao final da função *Equipe4*. O valor associado à variável *trab* indica se a equipe deverá ficar ociosa (caso *trab* seja igual a zero), se deve realizar *setup* (caso *trab* seja igual a “S”) ou se deve iniciar a execução de um trabalho (nesse caso, *trab* terá o número correspondente ao trabalho escolhido).

Embora o algoritmo seja longo, devido ao número de equipes e número de trabalhos envolvidos, é um algoritmo relativamente simples. Além disso, o fato da programação ser realizada para cada instante de tempo t torna o sistema flexível em relação ao horizonte de programação. Para essa pesquisa, o algoritmo foi repetido até que todos os trabalhos listados nos dados de entrada fossem concluídos. Na prática, o algoritmo poderia ser utilizado para horizontes menores, como uma semana ou um mês, por exemplo.

Para o teste dos demais modelos propostos, o algoritmo utilizado é praticamente igual ao apresentado para o método 5. Uma vez que os métodos diferem apenas em relação à priorização de trabalhos no estágio 4 (implantação), o algoritmo também só é diferente nas funções *Equipe4* e *Equipe4-final*, nos passos que se referem ao índice de priorização escolhido.

Para o método 1, em que os trabalhos são priorizados segundo a ordem crescente de prazos, são alterados os seguintes passos das funções *Equipe4* e *Equipe4-final*:

Passo 1: Definir a variável *prior* e associar a ela o valor 9999. Esse valor será, nos passos subsequentes, comparado ao prazo dos trabalhos.

Passo 5: Verificar o valor do índice de priorização do trabalho (nesse caso, é o prazo). Se o valor do índice for menor do que o valor da variável *prior*, ir para o passo 6. Caso contrário (índice maior ou igual ao valor de *prior*), ir para o passo 7.

Além desses passos, o passo 4 do algoritmo não precisa ser executado (corresponde ao cálculo do índice ATC, que não é utilizado no método 1). Como o índice de

priorização utilizado nesse caso é o prazo, que é um dado do problema (está informado na tabela de dados de entrada), não é necessário que seja calculado.

Para o método 2, em que os trabalhos são priorizados em função dos pesos w_j dos trabalhos, os passos das funções *Equipe4* e *Equipe4-final* são alterados para:

Passo 1: Definir a variável *prior* e associar a ela o valor -1. Esse valor será, nos passos subseqüentes, comparado ao índice de priorização dos trabalhos, que nesse caso é o peso do trabalho (w_j).

Passo 5: Verificar o valor do índice de priorização do trabalho (w_j). Se o valor do índice for maior do que o valor da variável *prior*, ir para o passo 6. Caso contrário (índice menor ou igual ao valor de *prior*), ir para o passo 7.

Além disso, assim como no método 1, o passo 4 do algoritmo não é necessário (o peso w_j também é um dado de entrada).

Para o método 3, os trabalhos são priorizados em função do tempo de fila dos trabalhos. Nesse caso, os passos das funções *Equipe4* e *Equipe4-final* são alterados para:

Passo 1: Definir a variável *prior* e associar a ela o valor -1. Esse valor será, nos passos subseqüentes, comparado ao índice de priorização dos trabalhos, o tempo de fila.

Passo 5: Verificar o valor do índice de priorização do trabalho (tempo de fila). Se o valor do índice for maior do que o valor da variável *prior*, ir para o passo 6. Caso contrário (índice menor ou igual ao valor de *prior*), ir para o passo 7.

Assim como nos métodos anteriores, o passo 4 não precisa ser executado. Nesse caso, o índice de priorização dos trabalhos é o tempo de fila, que é calculado no passo 34 do algoritmo (no primeiro ciclo do algoritmo, os tempos de fila estão com os valores zerados, mas podem ser indicados valores iniciais diferentes de zero, se necessário).

Finalmente, para o método 4, os trabalhos são selecionados em função do tempo de folga. Nesse caso, os passos das funções *Equipe4* e *Equipe4-final* são alterados para:

Passo 1: Definir a variável *prior* e associar a ela o valor 9999. Esse valor será, nos passos subseqüentes, comparado à folga dos trabalhos.

Passo 5: Verificar o valor do índice de priorização do trabalho (nesse caso, é a folga). Se o valor do índice for menor do que o valor da variável *prior*, ir para o passo 6. Caso contrário (índice maior ou igual ao valor de *prior*), ir para o passo 7.

Para o método 4, o passo 4 deverá ser executado, pois é necessário calcular o índice de priorização que será utilizado para o estágio 4. Nesse caso, o índice deverá corresponder à folga do trabalho, portanto o passo 4 deve ser alterado para:

Passo 4: Se o próximo estágio do trabalho é o estágio 4, calcular o índice de prioridade do trabalho para esse estágio, correspondente à folga do trabalho:

$$I_j = \max(d_j - p_j - t, 0) \quad (\text{Eq. 52})$$

No índice, d_j corresponde ao prazo e p_j ao tempo de processamento do trabalho no estágio 4. No primeiro ciclo, o tempo de processamento p_j corresponde ao valor informado na tabela de dados de entrada. Nos ciclos posteriores, o valor do tempo de processamento p_j corresponde ao tempo restante necessário para conclusão da atividade.

4.2. Resultados

Com o auxílio da ferramenta de experimentação desenvolvida, foi gerada uma seqüência completa de atividades utilizando cada um dos métodos propostos. Considerando que a função objetivo escolhida avalia os atrasos dos trabalhos, foi necessário gerar a programação até a conclusão de todos os trabalhos. Somente assim, todos os trabalhos têm um instante de término, que poderá ser comparado com o prazo do trabalho.

Para cada um dos métodos, foi gerada uma programação de atividades que indica qual trabalho deve ser processado por cada equipe, em cada instante de tempo.

A programação de atividades gerada para as equipes de coordenação por cada um dos métodos tem o formato apresentado na tabela 6. Na primeira coluna estão indicados os instantes de tempo (em horas) e nas demais colunas estão indicados os trabalhos a serem processados por cada equipe (são 4 equipes de coordenação). Os resultados apresentados na tabela 6 correspondem à primeira parte (primeiros instantes) da programação gerada com a utilização do método 5.

A partir da análise da tabela 6, percebe-se que o resultado gerado pelo simulador é de fácil compreensão. Tomando como exemplo a programação gerada para a primeira equipe de coordenação (equipe 1): a programação gerada pelo algoritmo indica que, no instante 0, a equipe deve iniciar o processamento do trabalho número 155. O tempo de processamento necessário para este trabalho é de apenas 1 hora, e portanto a partir do instante $t = 1$ a equipe já estará disponível para executar outras tarefas. No entanto, a programação indica que até o instante $t = 7$ nenhum trabalho está designado para esta equipe. Isso significa que a equipe ficará ociosa nesse período. A partir do instante $t = 7$, a equipe deverá processar o trabalho número 178, que também tem tempo de processamento

igual a uma hora. Pela simples análise da programação gerada, pode-se identificar os trabalhos com tempos de processamento mais longos, os períodos de ociosidade de cada equipe (que, na verdade, serão aproveitados para a execução de outras atividades, externas ao processo estudado), além de indicar o momento em que cada trabalho estará sendo processado por cada equipe.

Após a escolha do método a ser utilizado na empresa, podem ser utilizadas programações de atividades para horizontes mais curtos, de uma semana, por exemplo, para orientação das equipes. Além disso, as informações apresentadas na programação gerada poderiam ser facilmente representadas em Gráficos de Gantt.

Tabela 6

Programação de atividades para equipes de coordenação, método 5 (parcial)

t	Equipe 1	Equipe 2	Equipe 3	Equipe 4
0	155	190	191	0
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	178	71	140	0
8	91	192	193	194
9	195	196	197	198
10	139	145	199	200
11	187	201	202	203
12	204	205	206	203
13	207	208	209	203
14	181	208	190	203
15	72	208	210	211
16	179	208	191	211
17	179	208	39	211
18	61	208	76	212
19	182	213	214	199
20	182	160	215	216
21	217	160	218	216
22	219	220	221	216
23	40	222	223	224
24	66	225	223	226
25	28	85	223	226
26	41	50	132	171
27	227	228	229	193
28	192	194	230	231
29	62	137	195	198
30	62	0	0	0

Para as equipes de projeto, a programação gerada tem o formato apresentado na tabela 7. Nesta tabela, estão indicadas as equipes de projeto de cada uma das áreas. Nas tabelas geradas, os trabalhos indicados como zero correspondem a períodos de ociosidade, ou seja, períodos em que não existem trabalhos disponíveis para processamento.

Apenas pela visualização da tabela 7 já se pode perceber que a duração das tarefas executadas pelas equipes de projeto são mais longas que as tarefas executadas pelas equipes de coordenação, como já era previsto. Mais uma vez, a programação de atividades gerada é clara e indica exatamente o período em que cada trabalho deverá ser processado.

Tomando como exemplo a segunda equipe de projeto da área 2: esta equipe deverá realizar o trabalho de número 198 durante o período $t = 10$ a $t = 26$ e, a partir de $t = 26$, deverá realizar o trabalho número 204. Conclui-se, portanto, que o tempo total previsto para a elaboração do projeto referente ao trabalho 198 é 16 horas, e o projeto estará pronto no instante $t = 26$. Continuando a análise, pode-se retornar à tabela de programação de atividades das equipes de coordenação (tabela 6) e verificar que o trabalho 198 deverá ser processado pela equipe 4 de coordenação a partir do instante $t = 29$. Conclui-se, portanto, que embora o projeto esteja programado para ser concluído em $t = 26$, ele só será analisado pela equipe de coordenação a partir de $t = 29$, em função das filas de trabalhos.

Tabela 7

Programação de atividades para equipes de projeto, método 5 (parcial)

t	Área 1		Área 2		Área 3	
	Eq. 1	Eq. 2	Eq. 1	Eq. 2	Eq. 1	Eq. 2
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	193	194	192	0	0	0
10	193	194	192	198	0	0
11	193	194	192	198	199	0
12	193	194	192	198	199	0
13	193	194	192	198	199	0
14	193	194	192	198	199	0
15	193	194	192	198	199	0
16	193	194	192	198	0	0
17	193	194	192	198	0	0
18	193	194	192	198	0	0
19	195	194	192	198	208	0
20	195	194	192	198	208	0
21	195	194	192	198	208	0
22	195	194	192	198	208	0
23	195	194	202	198	208	0
24	195	196	202	198	208	224
25	195	196	202	198	208	224
26	197	196	202	204	208	224
27	197	196	202	204	208	224
28	197	196	202	204	208	224
29	197	196	202	204	208	224
30	197	196	202	204	208	224

Para as equipes de implantação, a programação de atividades tem o formato apresentado na tabela 8. Assim como no caso das equipes de projeto, as equipes estão separadas de acordo com a área em que atuam (lembrando que as equipes de implantação podem, eventualmente, realizar trabalhos de outras áreas).

Na tabela 8, estão indicados com S os intervalos de tempo correspondentes aos períodos de *setup*. Interpretando a tabela, percebe-se que, após a conclusão do trabalho número 181, a equipe 1 da área 3 deverá realizar o trabalho número 132, e o tempo de deslocamento entre as duas localidades está estimado em duas horas.

Tabela 8

Programação de atividades para equipes de implantação, método 5 (parcial)

t	Área 1					Área 2			Área 3		
	Eq. 1	Eq. 2	Eq. 3	Eq. 4	Eq. 5	Eq. 1	Eq. 2	Eq. 3	Eq. 1	Eq. 2	Eq. 3
0	140	91	139	145	71	178	S	S	S	S	S
1	140	91	139	145	71	178	S	187	181	S	S
2	140	91	139	145	71	178	179	187	181	S	S
3	140	91	139	145	71	178	179	187	181	182	S
4	140	91	139	145	71	178	179	187	181	182	160
5	140	91	139	145	71	178	179	187	181	182	160
6	140	91	139	145	71	178	179	187	181	182	160
7	190	91	139	145	191	61	179	187	181	182	160
8	190	72	139	145	191	61	179	187	181	182	160
9	190	72	139	145	191	61	179	187	181	182	160
10	190	72	39	62	191	61	179	187	181	182	160
11	190	72	39	62	191	61	179	76	181	182	160
12	190	72	39	62	191	61	179	76	181	182	160
13	190	72	39	62	191	61	179	76	181	182	160
14	28	72	39	62	191	61	179	76	S	182	160
15	28	40	39	62	191	61	179	76	S	182	160
16	28	40	39	62	66	61	S	76	132	182	160
17	28	40	85	62	66	61	S	76	132	182	160
18	28	40	85	62	66	171	S	S	132	182	160
19	28	40	85	62	66	171	50	41	132	S	160
20	28	40	85	62	66	171	50	41	132	137	S
21	28	40	85	62	66	171	50	41	132	137	S
22	28	40	85	62	66	171	50	41	132	137	S
23	28	21	85	62	66	171	50	41	132	137	S
24	28	21	85	62	48	171	50	41	132	137	S
25	30	21	17	62	48	S	50	41	S	137	S
26	30	21	17	62	48	S	S	S	S	137	199
27	30	21	17	62	48	S	70	100	S	137	199
28	30	21	17	62	48	138	70	100	S	137	199
29	30	21	17	159	48	138	70	100	2	S	199
30	30	21	17	159	48	138	70	100	2	67	199

Devido ao grande número de trabalhos utilizados para o teste dos métodos propostos, a programação completa de atividades para todas as equipes não está apresentada neste trabalho. Além disso, foram geradas programações para cada um dos cinco métodos propostos, o que resulta na elaboração de 15 tabelas de programação (são 3 tipos de equipes e 5 métodos propostos). As tabelas analisadas (tabelas 6, 7 e 8) mostram a

estrutura da programação gerada para cada equipe, que é suficiente para a compreensão do estudo realizado.

Para cada um dos métodos testados, foi avaliada a questão do atendimento dos prazos. Os atrasos foram analisados com base em tabelas com o formato da tabela 9, onde podem ser visualizados o prazo, o instante de término, o atraso (que ocorre apenas quando o término ocorre após o prazo), o peso do trabalho e o atraso ponderado para cada trabalho. Na tabela 9 estão representados apenas os 15 primeiros e os 5 últimos trabalhos da lista de dados de entrada utilizada para a simulação, e seus respectivos atrasos, obtidos com a utilização do método 5. A tabela completa, com a análise dos atrasos para os 631 trabalhos, ordenados conforme o método 5, está apresentada no apêndice D.

Tabela 9
Análise de atrasos, método 5 (parcial)

Trab.	Prazo	Térm.	Ti	Wi	Wi x Ti
1	240	80		8,97	
2	240	40		5,76	
3	240	58		5,76	
4	240	100		5,76	
5	240	92		5,76	
6	240	249	9	4,09	36,82
7	240	71		4,39	
8	240	138		4,39	
9	240	232		4,09	
10	240	263	23	4,09	94,10
11	240	627	387	4,09	1.583,39
12	240	253	13	4,09	53,19
13	240	123		4,09	
14	240	62		5,76	
15	240	147		5,76	
627	2048	2207	159	4,09	650,54
628	2048	2217	169	4,09	691,45
629	2048	1721		4,09	
630	2048	1708		4,09	
631	2088	2430	342	3,03	1.035,51

A primeira coluna da tabela 9 indica o número do trabalho (mesma numeração indicada na tabela de dados de entrada, na tabela 5). As duas colunas subseqüentes indicam o prazo (dado de entrada, recebido da empresa cliente) e o instante de término (obtido a partir da programação de atividades realizada). Analisando o trabalho número 1 da tabela, por exemplo, conclui-se que a utilização do método 5 implicaria na conclusão do trabalho 1 no instante $t = 80$, ou seja, com folga em relação ao prazo, que é $t = 240$. O preenchimento do instante de término, na tabela 9, corresponde ao passo número 11 do algoritmo proposto.

A partir da terceira coluna, são apresentados o atraso (calculado como a diferença entre o término programado e o prazo), o peso do trabalho (conforme informado na tabela de dados de entrada) e o atraso ponderado (calculado como a multiplicação do atraso pelo peso do trabalho). Conforme já salientado, trabalhos concluídos antes do prazo têm, por definição, atraso zero.

A partir da análise da tabela de atrasos gerada para cada um dos métodos, pode-se identificar, por exemplo, quais trabalhos serão concluídos em atraso, qual o atraso esperado para cada trabalho, quais trabalhos serão responsáveis por um incremento significativo do valor total de atrasos ponderados e quantos trabalhos serão atrasados. Com base nessas informações, podem ser negociadas prorrogações de prazos ou podem ser alteradas prioridades de trabalhos, por exemplo.

Somando todos os atrasos ponderados (apresentados, parcialmente, na última coluna da tabela 9), obtém-se o valor correspondente à função objetivo para o método 5.

Para cada um dos métodos testados foi gerada uma tabela semelhante à tabela 9. Essas tabelas serviram como base para as comparações entre os métodos, devido ao fato do principal objetivo considerado para a avaliação dos métodos ser relacionado aos atrasos.

4.3. Análise dos resultados

Para proceder a comparação entre os métodos foram analisados, principalmente, os seguintes aspectos das programações geradas:

- soma dos atrasos ponderados;
- soma dos atrasos;
- número de trabalhos atrasados.

Nesta pesquisa, a soma dos atrasos ponderados é o principal critério para avaliação dos métodos propostos. Essa é a medida de desempenho escolhida como função objetivo nesta pesquisa.

Para complementar a análise, é considerada também a soma dos atrasos de todos os trabalhos (sem ponderação). Essa soma corresponde ao atraso total, em horas, decorrente da utilização de cada método. Além de fornecer uma medida em horas (que a soma ponderada não fornece, devido aos atrasos estarem multiplicados pelos pesos dos trabalhos), o atraso em horas corresponde à situação em que todos os trabalhos têm o

mesmo peso. Essa medida de atraso também é interessante do ponto de vista do cálculo das multas, que atualmente não incorporam o peso de cada trabalho. Assim, a soma de atrasos pode servir como estimativa do valor a ser pago em multas.

Outro aspecto analisado é o número total de trabalhos que foram concluídos após o prazo (atrasados). A partir desse resultado pode-se calcular, por exemplo, qual o atraso médio dos trabalhos. O número de trabalhos atrasados também pode indicar como está a distribuição dos atrasos. Para um mesmo valor total de atrasos (soma de atrasos ou soma de atrasos ponderados), o número de trabalhos atrasados pode indicar se muitos trabalhos estão com atrasos pequenos ou se poucos trabalhos estão com atrasos grandes, por exemplo.

Na tabela 10 estão apresentados os resultados obtidos pelos diferentes métodos. Nas primeiras linhas da tabela, é apresentada uma análise comparativa do número de trabalhos atrasados para os diferentes métodos propostos. A simulação realizada para o método 1, por exemplo, resultou em um total de 278 trabalhos concluídos após o prazo, e 353 trabalhos concluídos dentro do prazo (totalizando os 631 trabalhos listados nos dados de entrada). O método 2, por exemplo, resultou em um número menor de trabalhos atrasados, apenas 238.

Na linha indicada como *Atrasos Ponderados*, está apresentada a soma de atrasos ponderados obtidos com a utilização de cada um dos métodos. O apêndice D, que mostra a tabela completa de atrasos gerada para o método 5, têm o detalhamento dos atrasos ponderados obtidos para cada trabalho a partir do método 5 (a tabela 9 também mostra, embora parcialmente, esses resultados). Somando todos os valores da última coluna da tabela do apêndice D, obtém-se o valor total 80.193, que está representado na tabela 10 na coluna indicada para o método 5.

Tabela 10
Comparação de atrasos

	Método 1: Prazo	Método 2: Prioridade	Método 3: Tempo de fila	Método 4: Folga	Método 5: ATC
Trabalhos terminados	631	631	631	631	631
No prazo	353	393	315	284	509
Atrasados	278	238	316	347	122
Atrasos Ponderados	207.417	196.073	407.194	372.508	80.193
Atrasos	48.741	55.769	90.079	81.291	23.244

A última linha da tabela comparativa indica o somatório dos atrasos, sem ponderação. Equivale ao somatório de atrasos quando todos os pesos são considerados unitários. Esses atrasos estão representados, para o método 5, na quarta coluna (indicada como T_i) da tabela do apêndice D (apresentada, parcialmente, na tabela 5). Somando todos os valores da coluna T_i da tabela do apêndice D, obtém-se o valor 23.244, conforme indicado na tabela 10, na coluna referente ao método 5. Para o método 1, por exemplo, verifica-se que o somatório de atrasos ponderados totalizou 207.417, enquanto o somatório de atrasos sem ponderação totalizou 48.741.

A partir da análise da tabela 10 pode-se concluir que o método 5 se mostra superior em relação aos três critérios destacados: o número de trabalhos terminados em atraso é o menor, além dos somatórios dos atrasos (ponderados ou não) também ser inferior aos valores calculados para os demais métodos propostos.

Dos métodos apresentados, o método 5 pode ser considerado o mais complexo, pois o índice proposto é composto do maior número de informações sobre o sistema. Analisando os índices de priorização propostos para os demais métodos, percebe-se que apenas o tempo de fila não é considerado para o cálculo do índice ATC (método 5).

Foram analisados também os tempos totais de *setup* do estágio de implantação. Embora nenhum dos métodos proponha a consideração dos tempos de *setup* no momento da priorização dos trabalhos, é interessante analisar os tempos totais de *setup* resultantes. A tabela 11 apresenta os valores percentuais obtidos para os diferentes métodos. Esses percentuais foram obtidos a partir da razão entre a soma dos tempos de *setup* no estágio 4 (implantação) e o tempo total necessário para a realização de todos os trabalhos (no tempo total estão incluídos os tempos de processamento, os tempos de ociosidade e os tempos de *setup*).

Tabela 11
Comparação do tempo total de *setup*

	Método 1: Prazo	Método 2: Prioridade	Método 3: Tempo de fila	Método 4: Folga	Método 5: ATC
Equipes da Área 1	1,25 %	1,41 %	1,24 %	1,26 %	1,47 %
Equipes da Área 2	3,22 %	3,60 %	3,38 %	3,51 %	3,54 %
Equipes da Área 3	5,78 %	5,61 %	5,48 %	6,34 %	5,64 %

Conforme demonstrado na tabela 11, não houve diferença importante entre os tempos de *setup* provocados pelos diferentes métodos. Considerando que o valor

percentual do tempo de *setup* é relativamente pequeno, não foi proposto nenhum método que vise minimizar diretamente o tempo de *setup*.

4.4. Considerações referentes à implementação dos algoritmos

Para a simulação do método 4, foi utilizado um cálculo para a folga que não considera os tempos de processamento do estágio 5 (análise de relatórios). Optou-se por utilizar essa simplificação devido à curta duração das atividades do estágio 5 frente à duração das atividades do estágio 4 (implantação). Para verificação das consequências dessa simplificação, foram realizadas duas simulações: na primeira, o índice foi calculado segundo a equação 53, em que p_{4j} é o tempo de processamento necessário no estágio 4.

$$I_j = \max(d_j - p_{4j} - t, 0) \quad (\text{Eq. 53})$$

Numa segunda simulação, a folga foi calculada segundo a equação 54, em que p_{4j} representa o tempo de processamento no estágio 4 e p_{5j} representa o tempo de processamento no estágio 5.

$$I_j = \max(d_j - p_{4j} - p_{5j} - t, 0) \quad (\text{Eq. 54})$$

Os resultados obtidos (tabela 12) mostraram que os resultados gerados pelos dois índices apresentaram poucas diferenças. A simplificação no cálculo da folga, inclusive, gerou resultados ligeiramente superiores. Com base nessa análise, optou-se por utilizar apenas o tempo de processamento do estágio 4 no cálculo da folga.

Tabela 12

Análise de atrasos do método 4 para as duas formas propostas para o cálculo das folgas

	$p_j = p_{4j}$	$p_j = p_{4j} + p_{5j}$
Trabalhos terminados	631	631
No prazo	284	280
Atrasados	347	351
Atrasos Ponderados	372.508	389.260
Atrasos	81.291	85.066

Também para o teste do método 5, foi proposta a simplificação do cálculo das folgas. Da mesma forma que para o método 4, o método 5 foi testado segundo dois índices de

priorização: o primeiro considera apenas o estágio 4 para o cálculo da folga (equação 55) e o segundo considera a soma dos estágios 4 e 5 (equação 56). Os resultados obtidos estão representados na tabela 13.

$$I_j(t) = \frac{w_j}{p_j} \exp\left(\frac{-\max(d_j - p_{4j} - t, 0)}{k \cdot \bar{p}}\right) \quad (\text{Eq. 55})$$

$$I_j(t) = \frac{w_j}{p_j} \exp\left(\frac{-\max(d_j - p_{4j} - p_{5j} - t, 0)}{k \cdot \bar{p}}\right) \quad (\text{Eq. 56})$$

Tabela 13

Análise de atrasos do método 5 para as duas formas propostas para o cálculo das folgas

	$p_j = p_{4j}$	$p_j = p_{4j} + p_{5j}$
Trabalhos terminados	631	631
No prazo	509	512
Atrasados	122	119
Atrasos Ponderados	80.193	82.545
Atrasos	23.244	23.802

Com base nos resultados obtidos, novamente optou-se por trabalhar com o cálculo simplificado, em que o tempo de processamento referente ao estágio 5 é desconsiderado.

Ainda para a simulação do método 5, foram testados três diferentes valores de k para o cálculo do índice I_j . Foram geradas programações completas para k igual a 2, 3 e 4,5. Observou-se que as três programações geraram resultados bastante semelhantes, conforme representado na tabela 14.

Tabela 14

Análise de atrasos do método 5 com diferentes valores de k

	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4,5$
Trabalhos terminados	631	631	631
No prazo	509	519	519
Atrasados	122	112	112
Atrasos Ponderados	80.193	83.442	90.269
Atrasos	23.244	24.160	26.035

A análise da tabela 14 permite verificar que os diferentes valores de k geram programações praticamente equivalentes em relação às medidas de desempenho

consideradas. Embora existam diferenças entre os atrasos obtidos, essas diferenças são pequenas quando comparadas aos valores obtidos pelos outros métodos. Após essa análise, optou-se por trabalhar, nessa pesquisa, com o valor de k igual a 2.

4.5. Considerações referentes à utilidade do método proposto

Nesta seção, serão apresentadas algumas observações a respeito da utilização do método de programação de atividades proposto.

Conforme foi apresentado anteriormente, o principal objetivo do desenvolvimento de um método de seqüenciamento de atividades para a empresa estudada está relacionado ao atendimento dos prazos. Conforme apresentado na seção de análise dos resultados, o quinto método proposto foi o método que apresentou melhores resultados em relação aos prazos.

Comparando o resultado da simulação com a situação atual da empresa, pode-se concluir que a implementação do método proposto tende a trazer uma importante melhoria no total de atrasos ponderados. Embora os valores reais obtidos para os atrasos não estejam apresentados no trabalho, eles são próximos aos valores obtidos com os métodos 1 (baseado no prazo), principalmente em função da maioria das equipes de implantação trabalharem com a priorização por prazo.

Além da questão do atendimento dos prazos, a utilização de uma sistemática para a programação das atividades já é, por si só, uma melhoria para a empresa. O método de programação de atividades proposto oferece à empresa uma possibilidade de organização que traz diversas vantagens:

- indica todas as atividades a serem executadas em cada intervalo de tempo, orientando as equipes,
- publica essas atividades, de forma que as equipes possam consultar as atividades das demais equipes,
- indica os períodos em que as equipes estarão ociosas, permitindo que sejam planejadas outras atividades, externas ao processo,
- indica áreas ou períodos mais ocupados, em que poderão ser utilizadas equipes adicionais para suporte.

- indica em que instante os trabalhos serão concluídos, oferecendo informações mais precisas à empresa cliente.

Além disso, da forma como o algoritmo foi modelado, ele facilmente incorpora atualizações nos dados. Mesmo que uma determinada equipe realize um trabalho que não estava programado, ou mesmo que a equipe atrase a execução de determinada atividade, essa informação pode ser atualizada na planilha de dados e a programação pode ser gerada novamente, considerando os dados atualizados. Atualizações nos tempo de processamento, nos pesos dos trabalhos ou mesmo nos tempos de *setup* são simples e podem ser realizadas em qualquer momento.

Para a implementação do método na empresa, um dos aspectos que deve ser estudado é a forma de previsão dos tempos de processamento. Esses tempos deverão ser informados, ou calculados, de maneira que o erro seja pequeno em relação aos tempos reais necessários, pois toda a programação é realizada em função desses tempos. Uma estimativa de tempos grosseira pode gerar programações de atividades impossíveis de serem realizadas, se os tempos forem subestimados. Por outro lado, uma superestimação dos tempos tende a permitir folgas maiores entre os trabalhos e subaproveitamento das equipes, o que também não é desejável.

Propõe-se que, para a estimação dos tempos, seja selecionado um grupo de funcionários da empresa para estudar o assunto, preferencialmente um grupo que inclua também funcionários de equipes de implantação.

Após a implementação do método na empresa, sugere-se que a programação das atividades seja realizada pelas equipes de coordenação, semanalmente, por exemplo, e repassada às demais equipes. Ao final da semana, as equipes podem indicar o andamento das atividades que lhes foram designadas, de forma que os tempos de processamento restantes podem ser atualizados antes mesmo da programação de atividades ser gerada para a semana seguinte.

Embora possam ser visualizadas algumas dificuldades para a implementação de um sistema de programação de atividades na empresa, essas dificuldades devem ser vistas como mais um motivo para a implementação. A implementação de um sistema desse tipo exigirá que a empresa organize também outros aspectos, o que tende a trazer benefícios ainda maiores para a empresa.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta pesquisa, foi abordada a questão da programação de atividades com o objetivo de minimizar a soma dos atrasos ponderados dos trabalhos. Por envolver a ponderação dos atrasos, este estudo abordou também a análise multicriterial para determinação dos pesos dos trabalhos.

Primeiramente, foi apresentada uma revisão da literatura a respeito da programação de atividades. Percebeu-se que, para a resolução de problemas de seqüenciamento, a atenção dos pesquisadores vem sendo direcionada ao desenvolvimento de métodos heurísticos (LEE et al., 1997; BONTRIDDER, 2005; VARADHARAJAN e RAJENDRAN, 2005). Problemas de seqüenciamento são problemas geralmente complexos, e os métodos heurísticos buscam oferecer soluções satisfatórias em relativamente pouco tempo (PINEDO, 1995).

Na segunda parte da revisão teórica da pesquisa, foram estudados métodos de análise multicriterial. Dentre os métodos estudados, os métodos de critério único de síntese foram destacados, especialmente os métodos AHP e MAUT.

Após a revisão da literatura, o estudo foi direcionado para o caso de uma empresa que atua no setor de telecomunicações. A partir da análise do processo da empresa, foi identificado o estágio crítico (o estágio de implantação) e, para esse estágio, foram propostos 5 métodos de seqüenciamento de atividades. O objetivo definido foi a minimização dos atrasos ponderados.

Para ponderação dos trabalhos, estes foram avaliados segundo cinco critérios, a partir dos quais foram calculados pesos (w_j) para cada trabalho. Os cinco critérios definidos foram: o retorno financeiro a curto e longo prazo, obrigatoriedade, concorrência e urgência. Para a reunião de todos esses critérios em um único valor de peso para cada trabalho, foi utilizada uma função utilidade.

Os métodos propostos para a priorização dos trabalhos no estágio de implantação podem ser resumidos como:

- método 1: seqüenciamento dos trabalhos em ordem crescente de prazo;
- método 2: seqüenciamento dos trabalhos em ordem decrescente de peso (w_j);
- método 3: seqüenciamento dos trabalhos em ordem decrescente de tempo de fila;
- método 4: seqüenciamento dos trabalhos em ordem crescente de folga;
- método 5: seqüenciamento dos trabalhos em ordem decrescente de ATC – *Apparent Tardiness Cost*.

Os cinco métodos de seqüenciamento foram testados através de simulação. Para cada método foi gerada uma programação completa para todos os recursos (equipes de trabalho). Os resultados gerados pela simulação foram analisados em relação a três aspectos:

- soma dos atrasos ponderados;
- soma dos atrasos;
- número de trabalhos atrasados.

Dentre os métodos propostos, o método 5, baseado no índice ATC, desenvolvido por Vepsalainen e Morton (1987), foi o método que apresentou melhores resultados. Esse método propõe a utilização de um índice de priorização dos trabalhos que é composto a partir do peso do trabalho, do tempo de processamento e da folga para conclusão do trabalho.

A partir da análise dos resultados, verificou-se os demais métodos acarretaram totais de atrasos ponderados pelo menos duas vezes maiores que o total obtido com a utilização do método 5. O mesmo pode ser dito do total de atrasos não ponderados: enquanto o valor do somatório obtido para o método 5 corresponde a aproximadamente 23 mil, o segundo melhor método sob esse critério de avaliação, o método 1, trouxe um atraso total de aproximadamente 48 mil. Considerando que atualmente as multas pagas são proporcionais ao somatório de atrasos (não ponderados), a diferença para os dois métodos propostos equivale ao pagamento do dobro de multas no caso da escolha do método 1.

A utilização de um método de programação de atividades é útil no sentido de organizar e planejar detalhadamente todas as etapas que devem ser executadas para a realização dos trabalhos. Atualmente, a empresa estudada não possui um sistema de planejamento de atividades que forneça esse tipo de resultado. A programação gerada pelo

algoritmo proposto fornece uma previsão realista do instante de conclusão de todos os trabalhos do sistema. A partir dessa programação, os potenciais atrasos podem ser identificados antecipadamente, permitindo que sejam analisados em conjunto com a empresa cliente antes mesmo de ocorrerem. A programação auxilia também a compreender os atrasos e, portanto, pode auxiliar a empresa a justificá-los frente à cliente.

A programação gerada pode, ainda, auxiliar a empresa no momento em que são estipulados, pela empresa cliente, os prazos de novos trabalhos. Nesse momento, um conhecimento mais detalhado da programação de atividades pode indicar prazos condizentes com a capacidade de produção da empresa. Após a definição de um prazo para um novo trabalho, pode-se ainda avaliar o impacto desse novo trabalho na programação. Numa análise desse tipo, podem ser questionados os prazos ou pode ser investigada a necessidade de contratação de novas equipes. Tendo essa visão da programação para longo prazo, a empresa pode programar melhor a utilização e a necessidade de recursos.

A utilização de uma sistemática para a programação de atividades também permite um controle mais eficiente do andamento dos trabalhos. A empresa poderia adotar algum sistema de atualização do andamento dos trabalhos a cada semana, por exemplo. Nesse caso, semanalmente, as equipes indicariam quais das atividades previstas foram concluídas e quais não foram. Após atualização dos dados, pode ser gerada uma nova programação de atividades.

Por indicarem quais trabalhos serão executados por cada equipe em cada instante, a programação de atividades indica, ao mesmo tempo, quais os períodos ociosos para cada equipe. A observação desses períodos pode permitir a realocação das equipes para outras tarefas. A longo prazo, esses estudos podem ser utilizados para o dimensionamento do número de equipes, através da identificação do volume de trabalho previsto a longo prazo para cada área do Estado.

No presente estudo, não foram propostos métodos que buscassem minimizar os tempos de *setup* verificados no estágio de implantação. No futuro, pode ser interessante verificar os custos associados a esses períodos de *setup* e investigar métodos que visem diminuir esses períodos. Um dos métodos que pode ser adequado ao caso é o método desenvolvido por Lee et al. (1997), em que os tempos de *setup* são considerados no índice proposto. Principalmente para empresas em que os tempos de *setup* são significativos, ou associados a um custo significativo, pode ser interessante avaliar a melhoria gerada pela diminuição dos *setups*.

Outra análise que pode enriquecer o presente estudo é uma análise mais detalhada das estimativas de tempos de processamento de todos os estágios do processo, assim

como dos tempos de *setup*. No presente estudo, foram utilizados tempos referentes a trabalhos já executados. Para que o método seja colocado em prática na empresa estudada, é necessário que a empresa forneça estimativas precisas antes dos trabalhos serem executados, de forma que a programação gerada seja realista.

Embora a pesquisa tenha concentrado sua atenção na questão do atendimento dos prazos, trabalhos futuros poderiam analisar também a qualidade dos serviços executados. Atualmente, a empresa mostra maior preocupação em relação aos prazos devido à grande quantidade de trabalhos que são concluídos em atraso. No momento em que a programação de atividades auxilia a diminuir ou, pelo menos, lidar de forma organizada com esses atrasos, a empresa pode tratar de outras questões relevantes do processo. A qualidade do serviço prestado é, sem dúvida, outro aspecto que a empresa cliente observa no momento de contratar empresas e estabelecer valores para prestação de serviços.

Finalmente, é importante salientar que o método apontado, embora tenha demonstrado ser adequado, foi testado apenas através de simulação. Para uma completa validação do método, este deveria ser implementado na empresa estudada e deveria ser realizado um acompanhamento, ao longo de um determinado período, para verificação dos resultados. Nesta fase, seriam tratadas quaisquer dificuldades em relação à utilização do método por parte dos funcionários e seriam esclarecidas dúvidas. A partir da implementação do método na empresa poderiam ser identificadas, também, outras possibilidades de melhoria no método proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCR – Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias. Distâncias entre municípios. Disponível em: <www.abcr.org.br> Acesso em: maio/2006.

BAKER, K. R.; SMITH, J. C. A multiple-criterion model for machine scheduling. **Journal of Scheduling**, v. 6, p. 7-16, 2003.

BELTON, V.; ELDER, M. D. Exploring a multicriteria approach to production scheduling. **Journal of the Operational Research Society**, v. 47, p. 162-174, 1996.

BERTEL, S.; BILLAUT, J.-C. A genetic algorithm for an industrial multiprocessor flow shop scheduling problem with recirculation. **European Journal of Operational Research**, v. 159, p. 651-662, 1994.

BEYNON, M. An analysis of distributions of priority values from alternative comparison scales within AHP. **European Journal of Operational Research**, v. 140, p. 104-117, 2002.

BONTRIDDER, K. M. J. Minimizing total weighted tardiness in a generalized job shop. **Journal of Scheduling**, v. 8, p. 479-496, 2005.

CLIFFORD, J. J.; POSNER, M. E. High multiplicity in earliness-tardiness scheduling. **Operations Research**, v. 48, n. 5, p. 788-800, 2000.

CONTADOR, J. L. Gerenciamento de projetos com PERT e CPM. In: CONTADOR, J. C. **Gestão de Operações: A Engenharia de Produção a Serviço da Modernização da Empresa**. 2.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1998.

CONTADOR, J. L.; CONTADOR, J. C. Programação e controle da produção para a indústria intermitente. In: CONTADOR, J. C. **Gestão de Operações: A Engenharia de Produção a Serviço da Modernização da Empresa**. 2.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1998.

CORRÊA, H.; GIANESI, I. Sistemas de planejamento e controle da produção. In: CONTADOR, J. C. **Gestão de Operações: A Engenharia de Produção a Serviço da Modernização da Empresa**. 2.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1998.

DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. Mapa rodoviário e localização dos municípios. Disponível em: <www.daer.rs.gov.br> Acesso em: maio/2006.

ELY, F. **Desenvolvimento de método de planejamento e programação de operações de prestação de serviços**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Faculdade de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2002.

ELSAYED, E. A.; BOUCHER, T. O. **Analysis and Control of Production Systems**. 2.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

ENSSLIN, L.; MONTIBELLER NETO, G.; NORONHA, S. M. **Apoio à Decisão – Metodologias para Estruturação de Problemas e Avaliação Multicritério de Alternativas**. Florianópolis: Insular, 2001.

FITZSIMMONS, J. A.; FITZSIMMONS, M. J. **Administração de Serviços – Operações, Estratégia, e Tecnologia de Informação**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2000.

GAITHER, N. **Production and Operations Management: a problem-solving and decision-making approach**. 6.ed. Forth Worth: Dryden, 1994.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M, C, G.; CARIGNANO, C. **Tomada de Decisões em Cenários Complexos: Introdução aos Métodos Discretos do Apoio Multicritério à Decisão**. São Paulo: Pioneira Thompson Learningh, 2004.

HALL, N. G.; POTTS, C. N. Rescheduling for new orders. **Operations Research**, v. 52, n. 3, p. 440-453, 2004.

HANSEN, P. B. Sistemas de Apoio à Decisão: Análise Multicriterial. Material Interno apresentado na disciplina de Engenharia Econômica, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – UFRGS, 2004.

HOOGEVEEN, H. Multicriteria scheduling. **European Journal of Operational Research**, v. 167, p. 592-623, 2005.

KANET, J. J.; LI, X. A weighted modified due date rule for sequencing to minimize weighted tardiness. **Journal of Scheduling**, v. 7, p. 261-276, 2004.

KEENEY, R. L. Analysis of preference dependencies among objectives. **Operations Research**, v. 29, n. 6, p. 1105-1120, 1981.

KEENEY, R. L. Decision analysis: an overview. **Operations Research**, v. 30, n. 5, p. 803-838, 1982.

KERLINGER, F. N. **Investigación del Comportamiento: Tecnicas y Metodologia**. México: Nueva Editorial Interamericana, 1975.

KRAJEWSKI, L. J.; RITZMAN, L. P. **Operations Management: Strategy and Analysis**. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

LEE, Y. H.; BHASKARAN, K.; PINEDO, M. A heuristic to minimize the total weighted tardiness with sequence-dependent setups. **IIE Transactions**, v. 29, n. 1, p. 45-52, 1997.

LOVA, A.; MAROTO, C.; TORMOS, P. A multicriteria heuristic method to improve resource allocation in multiproject scheduling. **European Journal of Operational Research**, v.127, p. 408-424, 2000.

MAUGUIÈRE, P.; BILLAUT, J.-C.; BOUQUARD, J.-L. New single machine and job-shop scheduling problems with availability constraints. **Journal of Scheduling**, v. 8, p. 211-231, 2005.

MOSHEIOV, G. Minimizing total completion time and total deviation of job completion times from a restrictive due-date. **European Journal of Operational Research**, v. 165, p. 20-3, 2005.

NAGAR, A.; HADDOCK, J.; HERAGU, S. Multiple and Bicriteria Scheduling: A Literature Survey. **European Journal of Operational Research**, v. 81, p. 88-104, 1995.

NG, C.T.; CHENG, T. C. E.; YUAN, J. J. Concurrent open shop scheduling to minimize the weighted number of tardy jobs. **Journal of Scheduling**, v. 6, p. 405-412, 2003.

PINEDO, M. **Scheduling: Theory, Algorithms and Systems**. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

RICHMOND, S. B. **Operations Research for Management Decisions**. New York: The Ronald Press Company, 1968.

SAATY, T. L. Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. **Management Science**, v. 32, n. 7, p. 841-855, 1986.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: Mc-Graw-Hill, Makron, 1991.

SAATY, T. L. Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network processes. **European Journal of Operational Research**, v. 168, p. 557-570, 2006.

SHTUB, A.; BARD, J. F.; GLOBESON, S. **Project Management: Engineering, Technology and Implementation**. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia de Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4.ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

SUN, X.; NOBLE, J. S. An approach to Job Shop Scheduling with Sequence-Dependent Setups. **Journal of Manufacturing Systems**, 1999.

SZWARC, W.; LIU, J. J. Weighted tardiness single machine scheduling with proportional weights. **Management Science**, v. 35, n. 9, p. 626-632, 1993.

T'KINDT, V.; BILLAUT, J.-C. Multicriteria Scheduling. **European Journal of Operational Research**, v. 167, p. 589-591, 2005.

VARADHARAJAN, T. K.; RAJENDRAN, C. A multi-objective simulated-annealing algorithm for scheduling in flowshops to minimize the makespan and total flowtime of jobs. **European Journal of Operational Research**, v. 167, p. 772-795, 2005.

VARGAS, L.; MALDONADO, G. Guia para apresentação de trabalhos científicos. Porto Alegre: UFRGS, 2001. Disponível em: <www.read.adm.ufrgs.br/editor/guia.pdf> Acesso em: março/2005.

VEPSALAINEN, A. P. J.; MORTON, T. E. Priority Rules for Job Shops with Weighted Tardiness Costs. **Management Science**, v. 33, n. 8, p. 1035-1047, 1987.

VIEIRA, G. E.; SOARES, M. M.; GASPAR JUNIOR, O. Otimização do Planejamento Mestre da Produção através de Algoritmos Genéticos. XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), Curitiba, 23 a 25 de outubro de 2002.

WAGNER, H. M. **Pesquisa Operacional**. 2.ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1986.

YANASSE, H. H.; BECCENERI, J. C.; SOMA, N. Y. A heuristic to solve a pattern sequencing problem base don partial orderings. XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), Curitiba, 23 a 25 de outubro de 2002.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Matriz de setups

Área	Localidade	Região	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Porto Alegre	1	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
2	Caxias do Sul	2	2	0	1	2	1	2	2	3	2	2	1	2
2	Lajeado	3	2	1	0	1	2	3	2	2	1	1	2	2
1	Taquari	4	2	2	1	0	2	3	2	1	1	3	2	3
2	Canela	5	2	1	2	2	0	2	2	4	2	2	2	3
2	Torres	6	2	2	3	3	2	0	1	4	3	2	2	4
1	Cidreira	7	2	2	2	2	2	1	0	2	3	3	3	4
1	Camaquã	8	2	3	2	1	4	4	2	0	2	2	4	2
3	Santa Cruz do Sul	9	2	2	1	1	2	3	3	2	0	2	3	2
2	Lagoa Vermelha	10	2	2	1	3	2	2	3	2	2	0	1	1
2	Vacaria	11	3	1	2	2	2	2	3	4	3	1	0	2
2	Passo Fundo	12	3	2	2	3	3	4	4	2	2	1	2	0
2	Sananduva	13	2	2	2	3	2	2	4	3	3	1	1	1
2	Erechim	14	3	3	3	3	4	4	4	3	3	2	2	1
2	Três Passos	15	4	4	4	4	5	5	5	5	4	3	3	2
3	Cruz Alta	16	4	3	3	3	5	6	6	3	2	2	3	2
3	Santa Maria	17	4	4	3	3	5	6	6	3	1	2	4	2
3	Santiago	18	5	5	4	4	6	6	6	3	4	5	4	4
3	Santo Ângelo	19	6	4	4	6	6	6	6	4	4	5	3	4
3	Alegrete	20	7	7	6	6	8	8	8	5	4	5	8	5
3	São Borja	21	7	7	6	6	7	7	7	7	5	4	5	5
3	Uruguaiana	22	8	8	7	7	9	9	9	9	7	8	8	7
3	Santa Rosa	23	6	6	5	6	7	7	7	6	4	5	5	4
3	Encruzilhada do Sul	24	2	3	2	1	4	5	4	1	1	4	4	4
3	Caçapava do Sul	25	3	3	3	2	5	6	5	2	2	4	5	4
3	São Gabriel	26	4	4	3	3	6	7	6	4	3	6	6	4
3	Pelotas	27	3	4	3	3	4	5	4	1	3	5	5	5
3	Mostardas	28	2	3	3	2	3	3	2	1	3	4	4	5
3	Candiota	29	4	5	4	4	5	6	5	2	3	5	5	5
3	Rio Grande	30	3	4	4	4	4	5	4	1	3	5	5	5
3	Jaguarão	31	5	6	6	5	5	6	5	3	4	7	7	7
3	Bagé	32	5	6	5	5	5	6	4	3	4	6	6	6
3	Santana do Livramento	33	6	6	5	5	7	9	8	5	4	6	6	6
3	Quaraí	34	8	8	7	6	9	10	9	7	5	8	8	7
3	Chuí	35	6	7	7	6	7	7	6	5	6	9	9	8

Área	Localidade	Região	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	Porto Alegre	1	2	3	4	4	4	5	6	7	7	8	6	2
2	Caxias do Sul	2	2	3	4	3	4	5	4	7	7	8	6	3
2	Lajeado	3	2	3	4	3	3	4	4	6	6	7	5	2
1	Taquari	4	3	3	4	3	3	4	6	6	6	7	6	1
2	Canela	5	2	4	5	5	5	6	6	8	7	9	7	4
2	Torres	6	2	4	5	6	6	6	6	8	7	9	7	5
1	Cidreira	7	4	4	5	6	6	6	6	8	7	9	7	4
1	Camaquã	8	3	3	5	3	3	3	4	5	7	9	6	1
3	Santa Cruz do Sul	9	3	3	4	2	1	4	4	4	5	7	4	1
2	Lagoa Vermelha	10	1	2	3	2	2	5	5	5	4	8	5	4
2	Vacaria	11	1	2	3	3	4	4	3	8	5	8	5	4
2	Passo Fundo	12	1	1	2	2	2	4	4	5	5	7	4	4
2	Sananduva	13	0	1	2	3	3	5	4	6	6	9	4	4
2	Erechim	14	1	0	2	2	3	3	2	4	4	8	2	4
2	Três Passos	15	2	2	0	2	3	4	2	5	4	6	2	5
3	Cruz Alta	16	3	2	2	0	1	2	2	3	2	3	3	3
3	Santa Maria	17	3	3	3	1	0	1	1	3	3	5	3	2
3	Santiago	18	5	3	4	2	1	0	2	2	1	3	2	2
3	Santo Ângelo	19	4	2	2	2	1	2	0	2	1	4	1	3
3	Alegrete	20	6	4	5	3	3	2	2	0	2	2	3	5
3	São Borja	21	6	4	4	2	3	1	1	2	0	2	2	5
3	Uruguaiana	22	9	8	6	3	5	3	4	2	2	0	3	6
3	Santa Rosa	23	4	2	2	3	3	2	1	3	2	3	0	5
3	Encruzilhada do Sul	24	4	4	5	3	2	2	3	5	5	6	5	0
3	Caçapava do Sul	25	5	4	4	2	1	3	3	3	4	4	5	1
3	São Gabriel	26	5	5	4	3	2	3	3	2	3	3	4	2
3	Pelotas	27	5	6	6	5	4	5	6	6	7	7	6	1
3	Mostardas	28	5	5	7	5	5	6	7	8	9	9	7	2
3	Candiota	29	6	6	5	5	3	4	6	4	5	5	6	2
3	Rio Grande	30	6	7	7	5	5	5	6	6	7	7	7	3
3	Jaguarão	31	8	8	8	8	5	5	6	5	6	6	7	3
3	Bagé	32	7	6	5	3	3	3	4	3	4	3	5	3
3	Santana do Livramento	33	7	6	5	3	3	2	4	2	3	2	4	4
3	Quaraí	34	8	8	6	5	4	3	2	2	3	1	5	6
3	Chuí	35	8	8	9	8	6	6	8	7	8	8	8	6

Área	Localidade	Região	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
1	Porto Alegre	1	3	4	3	2	4	3	5	5	6	8	6
2	Caxias do Sul	2	3	4	4	3	5	4	6	6	6	8	7
2	Lajeado	3	3	3	3	3	4	4	6	5	5	7	7
1	Taquari	4	2	3	3	2	4	4	5	5	5	6	6
2	Canela	5	5	6	4	3	5	4	5	5	7	9	7
2	Torres	6	6	7	5	3	6	5	6	6	9	10	7
1	Cidreira	7	5	6	4	2	5	4	5	4	8	9	6
1	Camaquã	8	2	4	1	1	2	1	3	3	5	7	5
3	Santa Cruz do Sul	9	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5	6
2	Lagoa Vermelha	10	4	6	5	4	5	5	7	6	6	8	9
2	Vacaria	11	5	6	5	4	5	5	7	6	6	8	9
2	Passo Fundo	12	4	4	5	5	5	5	7	6	6	7	8
2	Sananduva	13	5	5	5	5	6	6	8	7	7	8	8
2	Erechim	14	4	5	6	5	6	7	8	6	6	8	8
2	Três Passos	15	4	4	6	7	5	7	8	5	5	6	9
3	Cruz Alta	16	2	3	5	5	5	5	8	3	3	5	8
3	Santa Maria	17	1	2	4	5	3	5	5	3	3	4	6
3	Santiago	18	3	3	5	6	4	5	5	3	2	3	6
3	Santo Ângelo	19	3	3	6	7	6	6	6	4	4	2	8
3	Alegrete	20	3	2	6	8	4	6	5	3	2	2	7
3	São Borja	21	4	3	7	9	5	7	6	4	3	3	8
3	Uruguaiana	22	4	3	7	9	5	7	6	3	2	1	8
3	Santa Rosa	23	5	4	6	7	6	7	7	5	4	5	8
3	Encruzilhada do Sul	24	1	2	1	2	2	3	3	3	4	6	6
3	Caçapava do Sul	25	0	1	2	3	1	4	3	1	3	4	6
3	São Gabriel	26	1	0	2	5	2	4	3	2	1	3	5
3	Pelotas	27	2	2	0	2	1	1	2	2	3	6	4
3	Mostardas	28	3	5	2	0	3	1	4	5	7	9	3
3	Candiota	29	1	2	1	3	0	2	1	1	1	4	3
3	Rio Grande	30	4	4	1	1	2	0	1	1	5	7	3
3	Jaguarão	31	3	3	2	4	1	1	0	2	4	5	2
3	Bagé	32	1	2	2	5	1	1	2	0	2	4	4
3	Santana do Livramento	33	3	1	3	7	1	5	4	2	0	2	5
3	Quaraí	34	4	3	6	9	4	7	5	4	2	0	6
3	Chuí	35	6	5	4	3	3	3	2	4	5	6	0

Trabalho	T1	T2	T3	T4	T5	Ri	Di	Wi	Área	Região
617	1	13	1	22	3	1632	2048	4,0914	1	1
618	1	5	1	8	1	1632	2048	4,0914	1	1
619	6	69	6	113	16	1632	2048	4,0914	1	1
620	1	4	1	7	1	1632	2048	4,0914	1	1
621	3	34	3	56	8	1632	2048	4,0914	1	1
622	1	18	1	30	4	1632	2048	4,0914	1	1
623	1	7	1	11	1	1632	2048	4,0914	1	1
624	1	19	1	32	4	1632	2048	4,0914	1	1
625	1	8	1	13	1	1632	2048	4,0914	1	1
626	2	20	2	33	4	1632	2048	4,0914	1	1
627	1	8	1	14	2	1632	2048	4,0914	1	1
628	1	9	1	16	2	1632	2048	4,0914	1	1
629	2	23	2	39	5	1632	2048	4,0914	3	22
630	1	18	1	30	4	1632	2048	4,0914	3	16
631	7	78	7	128	19	1656	2088	3,0278	1	1

APÊNDICE C – Código utilizado para programação das atividades, método 5

'Declaração das variáveis:

```

Sub Macro1()

Dim t As Integer
Dim ti As Integer
Dim tf As Integer
Dim linha As Integer
Dim coluna As Integer
Dim linhat As Integer
Dim colunat As Integer
Dim n As Integer
Dim N1 As Integer 'nº de equipes de coordenação
Dim N2A As Integer 'nº de equipes de projeto - área 1
Dim N2B As Integer 'nº de equipes de projeto - área 2
Dim N2C As Integer 'nº de equipes de projeto - área 3
Dim N4A As Integer 'nº de equipes de implantação - área 1
Dim N4B As Integer 'nº de equipes de implantação - área 2
Dim N4C As Integer 'nº de equipes de implantação - área 3
Dim setup As Integer
Dim NT As Integer 'nº de equipes programadas até o momento
Dim trab
Dim prior As Integer
Dim rep As Integer

Dim a 'variáveis utilizadas para o cálculo do ATC
Dim b
Dim c
Dim k
Dim pm

```

'Atribuição de valores às variáveis:

```

Sheets("Principal").Select
ti = Cells(1, 5)
tf = Cells(1, 7)
N1 = Cells(7, 4)
N2A = Cells(8, 4)
N2B = Cells(9, 4)
N2C = Cells(10, 4)
N4A = Cells(11, 4)
N4B = Cells(12, 4)
N4C = Cells(13, 4)
t = ti
Sheets("Trabalhos").Select

```

'Zerar as colunas referentes aos tempos de fila dos estágios 1, 2 e 3:

```

linha = 1
While Cells(linha, 1).Value > ""
Cells(linha, 13) = 0
Cells(linha, 14) = 0
Cells(linha, 15) = 0
linha = linha + 1
Wend

```

'Início do ciclo. Passos 1 a 5:

```

While t < tf 'início do ciclo

linha = 1

While Cells(linha, 1).Value > "" 'analisa lista de trabalhos

```

```

If t >= Cells(linha, 6) Then 'compara ri
Cells(linha, 12) = 1 'verifica se o trab está disponível
coluna = 1
While Cells(linha, coluna) = 0 And coluna < 6
coluna = coluna + 1
If coluna = 6 Then
Cells(linha, 12) = 0
Else
End If
Wend
Cells(linha, 11) = coluna

'Cálculo do peso (wj) segundo regra ATC

If coluna = 4 Then
a = Cells(linha, 7) - Cells(linha, 4) - t

If a <= 0 Then
b = 1
Else
k = Cells(5, 17)
pm = Cells(8, 17)
b = Exp(-a / (k * pm))
End If

c = (Cells(linha, 8) / Cells(linha, 4)) * b
Cells(linha, 19) = c

Else
End If

Else
Cells(linha, 12) = 0
Cells(linha, 11) = 0
End If

linha = linha + 1

Wend

'Preencher tabela com instante atual. Passo 6:

linhat = t - ti + 8 'linha do próximo trabalho
Cells(linhat, 22) = t

'Escolha de trabalhos para equipes de coordenação. Passos 7 a 14:

For n = 1 To N1 'São N1 equipes de coordenação
colunat = 22 + n 'coluna do trab atual da equipe n
trab = Cells(linhat - 1, colunat) 'trab atual equipe n

If trab > 0 Then

If Cells(trab, 11) = 1 Or Cells(trab, 11) = 3 Or
Cells(trab, 11) = 5 Then
'se ainda não terminou o trab atual, continuar
'escrever na tabela
Cells(linhat, colunat) = trab
Else
If Cells(trab, 5) = 0 Then 'terminou est. 5
Cells(trab, 16) = t 'escrever término
Else
End If
'escolher o próximo trabalho e escrever na tabela
Call Equipel(linhat, colunat, trab, N1)
End If

```

```

Else
    'escolher o próximo trabalho e escrever na tabela
    Call Equipe1(linhat, colunat, trab, N1)
End If

Next

NT = N1 'número de equipes já analisadas

'Escolha de trabalhos para equipes de projeto. Passos 15 a 20:

'Equipes do estágio 2 (projeto)
'São N2A equipes de projeto na área A (=área 1)
'São N2B equipes de projeto na área B (=área 2)
'São N2C equipes de projeto na área C (=área 3)

For n = 1 To N2A
    colunat = 22 + NT + n                'coluna do trab atual da equipe n
    trab = Cells(linhat - 1, colunat)'trab atual equipe n

    If trab > 0 Then

        If Cells(trab, 11) = 2 Then
            'se ainda não terminou o trab atual, continuar
            'escrever na tabela
            Cells(linhat, colunat) = trab
        Else
            'escolher o próximo trabalho e escrever na tabela
            Call Equipe2A(linhat, colunat, trab, NT, N2A)
        End If

    Else
        'escolher o próximo trabalho e escrever na tabela
        Call Equipe2A(linhat, colunat, trab, NT, N2A)
    End If

Next

NT = NT + N2A 'número de equipes já analisadas após equipes 2A

For n = 1 To N2B
    colunat = 22 + NT + n                'coluna do trab atual da equipe n
    trab = Cells(linhat - 1, colunat)'trab atual equipe n

    If trab > 0 Then

        If Cells(trab, 11) = 2 Then
            'se ainda não terminou o trab atual, continuar
            'escrever na tabela
            Cells(linhat, colunat) = trab
        Else
            'escolher o próximo trabalho e escrever na tabela
            Call Equipe2B(linhat, colunat, trab, NT, N2B)
        End If

    Else
        'escolher o próximo trabalho e escrever na tabela
        Call Equipe2B(linhat, colunat, trab, NT, N2B)
    End If

Next

NT = NT + N2B 'número de equipes já analisadas após equipes 2B

For n = 1 To N2C
    colunat = 22 + NT + n                'coluna do trab atual da equipe n
    trab = Cells(linhat - 1, colunat)'trab atual equipe n

```

```

If trab > 0 Then

    If Cells(trab, 11) = 2 Then
        'se ainda não terminou o trab atual, continuar
        'escrever na tabela
        Cells(linhat, colunat) = trab
    Else
        'escolher o próximo trabalho e escrever na tabela
        Call Equipe2C(linhat, colunat, trab, NT, N2C)
    End If

    Else
        'escolher o próximo trabalho e escrever na tabela
        Call Equipe2C(linhat, colunat, trab, NT, N2C)
    End If

Next

NT = NT + N2C 'número de equipes já analisadas após equipes 2C

'Escolha de trabalhos para equipes de implantação. Passos 21 a 27:

'Equipes do estágio 4 (implantação)
'São N4A equipes de implantação na área A (=área 1)
'São N4B equipes de implantação na área B (=área 2)
'São N4C equipes de implantação na área C (=área 3)

For n = 1 To N4A
    colunat = 22 + NT + n          'coluna do trab atual da equipe n
    trab = Cells(linhat - 1, colunat)'trab atual equipe n

    If trab = "S" Then

        If Cells(2, colunat) > 0 Then
            Cells(linhat, colunat) = "S"
        Else
            'indicar o próximo trabalho, definido na linha 3, colunat
            trab = Cells(3, colunat)
            Cells(linhat, colunat) = trab
            Cells(3, colunat) = 0    'zera a linha de próximo trabalho
            Cells(1, colunat) = Cells(trab, 10)
                                   'anota a região do trabalho escolhido
        End If

    Else

        If trab > 0 Then

            If Cells(trab, 11) = 4 Then
                'se ainda não terminou o trab atual, continuar
                'escrever na tabela
                Cells(linhat, colunat) = trab
            Else
                'escolher o próximo trabalho e escrever na tabela
                Call Equipe4A(linhat, colunat, trab, NT, N4A, N4B, N4C)
            End If

            Else
                'escolher o próximo trabalho e escrever na tabela
                Call Equipe4A(linhat, colunat, trab, NT, N4A, N4B, N4C)
            End If

        End If

    End If

Next

NT = NT + N4A    'número de equipes já analisadas após equipes 4A

```

```

For n = 1 To N4B
    colunat = 22 + NT + n           'coluna do trab atual da equipe n
    trab = Cells(linhat - 1, colunat)'trab atual equipe n

    If trab = "S" Then

        If Cells(2, colunat) > 0 Then
            Cells(linhat, colunat) = "S"
        Else
            'indicar o próximo trabalho, definido na linha 3, colunat
            trab = Cells(3, colunat)
            Cells(linhat, colunat) = trab
            Cells(3, colunat) = 0   'zera a linha de próximo trabalho
            Cells(1, colunat) = Cells(trab, 10)
                                   'anota a região do trabalho escolhido
        End If

    Else

        If trab > 0 Then

            If Cells(trab, 11) = 4 Then
                'se ainda não terminou o trab atual, continuar
                'escrever na tabela
                Cells(linhat, colunat) = trab
            Else
                'escolher o próximo trabalho e escrever na tabela
                Call Equipe4B(linhat, colunat, trab, NT, N4A, N4B, N4C)
            End If

        Else
            'escolher o próximo trabalho e escrever na tabela
            Call Equipe4B(linhat, colunat, trab, NT, N4A, N4B, N4C)
        End If

    End If

Next

NT = NT + N4B   'número de equipes já analisadas após equipes 4B

For n = 1 To N4C
    colunat = 22 + NT + n           'coluna do trab atual da equipe n
    trab = Cells(linhat - 1, colunat)'trab atual equipe n

    If trab = "S" Then

        If Cells(2, colunat) > 0 Then
            Cells(linhat, colunat) = "S"
        Else
            'indicar o próximo trabalho, definido na linha 3, colunat
            trab = Cells(3, colunat)
            Cells(linhat, colunat) = trab
            Cells(3, colunat) = 0   'zera a linha de próximo trabalho
            Cells(1, colunat) = Cells(trab, 10)
                                   'anota a região do trabalho escolhido
        End If

    Else

        If trab > 0 Then

            If Cells(trab, 11) = 4 Then
                'se ainda não terminou o trab atual, continuar
                'escrever na tabela
                Cells(linhat, colunat) = trab
            Else
        
```



```

        'escolher o próximo trabalho e escrever na tabela
        Call Equipe4C(linhat, colunat, trab, NT, N4A, N4B, N4C)
    End If

    Else
        'escolher o próximo trabalho e escrever na tabela
        Call Equipe4C(linhat, colunat, trab, NT, N4A, N4B, N4C)
    End If

End If

Next

NT = NT + N4C    'número de equipes já analisadas após equipes 4C

'Escolha de trabalhos para equipes de implantação. Passos 28 a 32:

For n = 1 To (N4A + N4B + N4C)

    colunat = 22 + N1 + N2A + N2B + N2C + n    'trab atual da equipe n
    trab = Cells(linhat, colunat)

    If trab = 0 Then    'equipe ociosa? Verificar filas outras áreas

        Call Equipe4(linhat, colunat, trab, NT, N4A, N4B, N4C)

    Else
    End If

Next

'Incrementar tempo. Passo 33:

t = t + 1

'Incrementar tempos de fila. Passo 34:

While Cells(linha, 1).Value > ""

    If Cells(linha, 12) = 1 Then    'verifica se disponível

        coluna = Cells(linha, 11)

        Select Case coluna
            Case Is = 1    'estágio 1
                Cells(linha, 13) = Cells(linha, 13) + 1
            Case Is = 2    'estágio 2
                Cells(linha, 14) = Cells(linha, 14) + 1
            Case Is = 3    'estágio 3
                Cells(linha, 15) = Cells(linha, 15) + 1
            Case Else
            End Select

    Else
    End If

    linha = linha + 1

Wend

'Diminuir tempo de processamento dos trabalhos escolhidos. Passo 35:

For coluna = 23 To (22 + NT)

    trab = Cells(linhat, coluna)

    If trab = "S" Then
        Cells(2, coluna) = Cells(2, coluna) - 1
    End If

```

```

Else
  If trab > 0 Then
    colunat = Cells(trab, 11)
    Cells(trab, colunat) = Cells(trab, colunat) - 1
  Else
    End If
  End If
End If

Next

'Passo 36:

Wend

'Verificar trabalhos concluídos em t=tf. Passo 37:

linha = 1

While Cells(linha, 1).Value > "" 'testar se é vazio

  If Cells(linha, 11) = 5 And Cells(linha, 12) = 1 And
    Cells(linha, 5) = 0 Then
    Cells(linha, 16) = tf
  Else
    End If

  linha = linha + 1

Wend

'Passo 38:

'Atualizar informação de Próximo estágio e Disponível (não necessário)
linha = 1

While Cells(linha, 1).Value > "" 'testar se é vazio!

  If t >= Cells(linha, 6) Then 'compara ri
    Cells(linha, 12) = 1
    coluna = 1
    While Cells(linha, coluna) = 0 And coluna < 6
      coluna = coluna + 1
      If coluna = 6 Then
        Cells(linha, 12) = 0
      Else
        End If
    Wend
    Cells(linha, 11) = coluna
  Else
    Cells(linha, 12) = 0
    Cells(linha, 11) = 0
  End If

  linha = linha + 1

Wend

End Sub      'Fim

'Função Equipel:

Function Equipel(linhat, colunat, trab, N1)

linha = 1
trab = 0
prior = 9999

```

```

'Primeiro verifica fila do estágio 5
'Prioridade é dada para os menores prazos

While Cells(linha, 1).Value > ""
  If Cells(linha, 11) = 5 And Cells(linha, 12) = 1 And
    Cells(linha, 7) < prior Then

    'Verificar se o trab está c/ outra equipe:

    rep = 0

    For coluna = 23 To (22 + N1)

      If linha = Cells(linhat, coluna) Or
        linha = Cells(linhat - 1, coluna) Then
        rep = 1
        coluna = 22 + N1 'para sair do "for"
      Else
      End If

    Next

    If rep = 0 Then
      trab = linha
      prior = Cells(linha, 7)
    Else
    End If

    linha = linha + 1

  Wend

  'Se, após analisar a fila do estágio 5, trab = 0
  'analisar filas dos estágios 1 e 3

  If trab = 0 Then

    linha = 1
    prior = -1

    While Cells(linha, 1).Value > ""

      If Cells(linha, 12) = 1 Then 'disponível?

        If Cells(linha, 11) = 1 And Cells(linha, 13) > prior Then

          'Verificar se o trab está c/ outra equipe

          rep = 0

          For coluna = 23 To (22 + N1)

            If linha = Cells(linhat, coluna) Or
              linha = Cells(linhat - 1, coluna) Then
              rep = 1
              coluna = 22 + N1
            Else
            End If

          Next

          If rep = 0 Then
            trab = linha
            prior = Cells(linha, 13)
          End If
        End If
      End If
    End While
  End If
End While

```

```

        Else
        End If

Else
End If

If Cells(linha, 11) = 3 And Cells(linha, 15) > prior Then

    'Verificar se o trab está c/ outra equipe

    rep = 0

    For coluna = 23 To (22 + N1)

        If linha = Cells(linhat, coluna) Or
            linha = Cells(linhat - 1, coluna) Then
            rep = 1
            coluna = 22 + N1
        Else
        End If

    Next

    If rep = 0 Then
        trab = linha
        prior = Cells(linha, 15)
    Else
    End If

Else
End If

Else 'se não estiver disponível
End If

linha = linha + 1

Wend

Else 'trab diferente de 0
End If

Cells(linhat, colunat) = trab 'Escrever na tabela

End Function

'Função Equipe2:

    'Priorização dos trabalhos em função dos tempos de fila

Function Equipe2A(linhat, colunat, trab, NT, N2A) 'Área 1

linha = 1
trab = 0
prior = -1

While Cells(linha, 1).Value > ""

    If Cells(linha, 11) = 2 And Cells(linha, 12) = 1 And
        Cells(linha, 9) = 1 And Cells(linha, 14) > prior Then

        'Verificar se o trab está c/ outra equipe

        rep = 0

        For coluna = 23 + NT To (22 + NT + N2A)

```

```

        If linha = Cells(linhat, coluna) Or
            linha = Cells(linhat - 1, coluna) Then
            rep = 1
            coluna = 22 + NT + N2A
        Else
        End If

    Next

    If rep = 0 Then
        trab = linha
        prior = Cells(linha, 14)
    Else
    End If

    linha = linha + 1

Wend

Cells(linhat, colunat) = trab      'Escrever na tabela

End Function

Function Equipe2B(linhat, colunat, trab, NT, N2B) 'Área 2

    linha = 1
    trab = 0
    prior = -1

    While Cells(linha, 1).Value > ""

        If Cells(linha, 11) = 2 And Cells(linha, 12) = 1 And
            Cells(linha, 9) = 2 And Cells(linha, 14) > prior Then

            'Verificar se o trab está c/ outra equipe

            rep = 0

            For coluna = 23 + NT To (22 + NT + N2B)

                If linha = Cells(linhat, coluna) Or
                    linha = Cells(linhat - 1, coluna) Then
                    rep = 1
                    coluna = 22 + NT + N2B
                Else
                End If

            Next

            If rep = 0 Then
                trab = linha
                prior = Cells(linha, 14)
            Else
            End If

        Else
        End If

        linha = linha + 1

    Wend

    Cells(linhat, colunat) = trab      'Escrever na tabela

End Function

```

```

Function Equipe2C(linhat, colunat, trab, NT, N2C) 'Área 3

linha = 1
trab = 0
prior = -1

While Cells(linha, 1).Value > ""

  If Cells(linha, 11) = 2 And Cells(linha, 12) = 1 And
    Cells(linha, 9) = 3 And Cells(linha, 14) > prior Then

    'Verificar se o trab está c/ outra equipe

    rep = 0

    For coluna = 23 + NT To (22 + NT + N2C)

      If linha = Cells(linhat, coluna) Or
        linha = Cells(linhat - 1, coluna) Then
        rep = 1
        coluna = 22 + NT + N2C
      Else
      End If

    Next

    If rep = 0 Then
      trab = linha
      prior = Cells(linha, 14)
    Else
    End If

  Else
  End If

  linha = linha + 1

Wend

Cells(linhat, colunat) = trab 'Escrever na tabela

End Function

```

'Função Equipe4:

```

Function Equipe4A(linhat, colunat, trab, NT, N4A, N4B, N4C) 'Área 1

linha = 1
trab = 0
prior = -1

While Cells(linha, 1).Value > ""

  If Cells(linha, 11) = 4 And Cells(linha, 12) = 1 And
    Cells(linha, 9) = 1 And Cells(linha, 19) > prior Then

    'Verificar se o trab está c/ outra equipe
    'No caso do estágio 4, ver se tem equipe em setup para o trab

    rep = 0

    For coluna = 23 + NT To (22 + NT + N4A + N4B + N4C)

      If linha = Cells(linhat, coluna) Or
        linha = Cells(linhat - 1, coluna) Or
        linha = Cells(3, coluna) Then

```

```

        rep = 1
        coluna = 22 + NT + N4A + N4B + N4C
    Else
    End If

Next

If rep = 0 Then
    trab = linha
    prior = Cells(linha, 19)
Else
End If

Else
End If

linha = linha + 1

Wend

If trab > 0 Then

    'Após escolher o trabalho, considerar o setup até lá

    linha = Cells(1, colunat)
    coluna = Cells(trab, 10)
    setup = Sheets("Setup4").Cells(linha, coluna)

    If setup = 0 Then

        Cells(linhat, colunat) = trab
        Cells(1, colunat) = coluna

    Else

        Cells(linhat, colunat) = "S"      ' próx trab é setup
        Cells(2, colunat) = setup        ' anotar tempo de setup
        Cells(3, colunat) = trab         ' anotar o trab depois do setup

    End If

Else

    Cells(linhat, colunat) = trab      ' caso trab = 0

End If

End Function

Function Equipe4B(linhat, colunat, trab, NT, N4A, N4B, N4C) 'Área 2

    linha = 1
    trab = 0
    prior = -1

    While Cells(linha, 1).Value > ""

        If Cells(linha, 11) = 4 And Cells(linha, 12) = 1 And
            Cells(linha, 9) = 2 And Cells(linha, 19) > prior Then

            'Verificar se o trab está c/ outra equipe
            'No caso do estágio 4, ver se tem equipe em setup para o trab

            rep = 0

            For coluna = (23 + NT - N4A) To (22 + NT + N4B + N4C)

```

```

        If linha = Cells(linhat, coluna) Or
            linha = Cells(linhat - 1, coluna) Or
                linha = Cells(3, coluna) Then
            rep = 1
            coluna = 22 + NT + N4B + N4C
        Else
        End If

    Next

    If rep = 0 Then
        trab = linha
        prior = Cells(linha, 19)
    Else
    End If

Else
End If

linha = linha + 1

Wend

If trab > 0 Then

    'Após escolher o trabalho, considerar o setup até lá

    linha = Cells(1, colunat)
    coluna = Cells(trab, 10)
    setup = Sheets("Setup4").Cells(linha, coluna)

    If setup = 0 Then

        Cells(linhat, colunat) = trab
        Cells(1, colunat) = coluna

    Else

        Cells(linhat, colunat) = "S"      'próx trab é setup
        Cells(2, colunat) = setup        'anotar tempo de setup
        Cells(3, colunat) = trab         'anotar o trab depois do setup

    End If

Else

    Cells(linhat, colunat) = trab      'caso trab = 0

End If

End Function

Function Equipe4C(linhat, colunat, trab, NT, N4A, N4B, N4C) 'Área 3

    linha = 1
    trab = 0
    prior = -1

    While Cells(linha, 1).Value > ""

        If Cells(linha, 11) = 4 And Cells(linha, 12) = 1 And
            Cells(linha, 9) = 3 And Cells(linha, 19) > prior Then

            'Verificar se o trab está c/ outra equipe
            'No caso do estágio 4, ver se tem equipe em setup para o trab

            rep = 0

```



```

For coluna = (23 + NT - N4A - N4B) To (22 + NT + N4C)
    If linha = Cells(linhat, coluna) Or
        linha = Cells(linhat - 1, coluna) Or
            linha = Cells(3, coluna) Then
        rep = 1
        coluna = 22 + NT + N4C
    Else
    End If

Next

If rep = 0 Then
    trab = linha
    prior = Cells(linha, 19)
Else
End If

Else
End If

linha = linha + 1

Wend

If trab > 0 Then

    'Após escolher o trabalho, considerar o setup até lá

    linha = Cells(1, colunat)
    coluna = Cells(trab, 10)
    setup = Sheets("Setup4").Cells(linha, coluna)

    If setup = 0 Then

        Cells(linhat, colunat) = trab
        Cells(1, colunat) = coluna

    Else

        Cells(linhat, colunat) = "S"      'próx trab é setup
        Cells(2, colunat) = setup      'anotar tempo de setup
        Cells(3, colunat) = trab      'anotar o trab depois do setup

    End If

Else

    Cells(linhat, colunat) = trab      'caso trab = 0

End If

End Function

'Função Equipe4-final:

Function Equipe4(linhat, colunat, trab, NT, N4A, N4B, N4C)

    linha = 1
    trab = 0
    prior = -1

    While Cells(linha, 1).Value > ""

        If Cells(linha, 11) = 4 And Cells(linha, 12) = 1 And

```

```

Cells(linha, 19) > prior Then

'Verificar se o trab está c/ outra equipe
'No caso do estágio 4, ver se tem equipe em setup para o trab

rep = 0

For coluna = (23 + N1 + N2A + N2B + N2C) To (22 + NT)

    If linha = Cells(linhat, coluna) Or
        linha = Cells(linhat - 1, coluna) Or
            linha = Cells(3, coluna) Then
        rep = 1
        coluna = 22 + NT
    Else
    End If

Next

If rep = 0 Then
    trab = linha
    prior = Cells(linha, 19)
Else
End If

Else
End If

linha = linha + 1

Wend

If trab > 0 Then

    'Após escolher o trabalho, considerar o setup até lá

    linha = Cells(1, colunat)
    coluna = Cells(trab, 10)
    setup = Sheets("Setup4").Cells(linha, coluna)

    If setup = 0 Then

        Cells(linhat, colunat) = trab
        Cells(1, colunat) = coluna

    Else

        Cells(linhat, colunat) = "S"      'próx trab é setup
        Cells(2, colunat) = setup      'anotar tempo de setup
        Cells(3, colunat) = trab      'anotar o trab depois do setup

    End If

Else

    'Cells(linhat, colunat) = trab (já ok)

End If

End Function

```

APÊNDICE D – Resultados da simulação, método 5

Trab.	Prazo	Térm.	Ti	Wi	Wi x Ti
1	240	80		8,97	
2	240	40		5,76	
3	240	58		5,76	
4	240	100		5,76	
5	240	92		5,76	
6	240	249	9	4,09	36,82
7	240	71		4,39	
8	240	138		4,39	
9	240	232		4,09	
10	240	263	23	4,09	94,10
11	240	627	387	4,09	1.583,39
12	240	253	13	4,09	53,19
13	240	123		4,09	
14	240	62		5,76	
15	240	147		5,76	
16	240	122		4,39	
17	240	36		4,39	
18	240	181		4,39	
19	240	213		4,39	
20	240	96		4,39	
21	240	33		4,39	
22	240	161		4,39	
23	1928	1287		5,76	
24	240	169		5,76	
25	1928	1295		5,76	
26	240	158		4,09	
27	240	179		5,76	
28	240	26		5,76	
29	240	105		8,97	
30	240	42		6,20	
31	240	469	229	3,03	693,37
32	240	188		6,20	
33	240	217		4,39	
34	240	373	133	3,03	402,70
35	240	513	273	3,03	826,59
36	500	1674	1174	3,03	3.554,63
37	500	1437	937	3,03	2.837,04
38	240	76		4,09	
39	240	18		4,09	
40	240	24		4,09	
41	240	27		5,76	
42	240	211		3,03	
43	240	106		3,03	
44	240	1102	862	3,03	2.609,96
45	240	542	302	4,09	1.235,61
46	240	162		4,09	
47	240	232		5,76	
48	240	34		4,39	
49	240	138		6,20	
50	240	27		6,20	
51	500	1345	845	3,03	2.558,49
52	240	1009	769	3,03	2.328,38
53	240	372	132	4,09	540,07
54	240	241	1	4,09	4,09
55	240	354	114	4,09	466,42
56	240	57		6,20	
57	240	111		4,09	
58	240	70		8,97	
59	240	140		4,09	
60	240	192		4,09	
61	56	19		6,20	
62	240	31		8,97	
63	240	99		8,97	
64	240	196		4,09	

Trab.	Prazo	Térm.	Ti	Wi	Wi x Ti
65	500	1608	1108	3,03	3.354,80
66	240	25		4,09	
67	240	42		6,20	
68	240	101		6,20	
69	240	145		3,85	
70	240	37		5,76	
71	240	8		4,39	
72	240	16		4,39	
73	240	48		4,39	
74	240	757	517	4,09	2.115,27
75	240	499	259	4,09	1.059,68
76	240	19		8,97	
77	240	182		4,09	
78	240	172		4,09	
79	240	205		8,97	
80	240	721	481	3,03	1.456,37
81	240	988	748	3,03	2.264,79
82	240	263	23	4,09	94,10
83	240	480	240	4,09	981,95
84	240	656	416	4,09	1.702,04
85	240	26		4,09	
86	240	276	36	4,09	147,29
87	240	56		4,09	
88	240	80		8,97	
89	240	324	84	3,03	254,33
90	312	186		6,20	
91	240	9		6,20	
92	240	126		6,20	
93	240	648	408	3,03	1.235,34
94	240	150		4,09	
95	240	549	309	4,09	1.264,25
96	240	332	92	4,09	376,41
97	240	504	264	4,09	1.080,14
98	240	333	93	4,09	380,50
99	240	413	173	4,09	707,82
100	240	35		4,09	
101	240	562	322	4,09	1.317,44
102	240	457	217	4,09	887,84
103	240	242	2	4,09	8,18
104	240	46		4,09	
105	240	276	36	4,09	147,29
106	240	310	70	3,03	211,95
107	240	80		4,09	
108	240	105		4,09	
109	240	57		4,09	
110	240	131		4,09	
111	240	148		4,09	
112	240	71		4,09	
113	240	102		4,09	
114	240	251	11	4,09	45,01
115	240	220		4,09	
116	240	142		4,09	
117	240	246	6	4,09	24,55
118	240	297	57	4,09	233,21
119	240	348	108	4,09	441,88
120	240	91		4,09	
121	240	161		4,09	
122	240	69		4,09	
123	240	174		4,09	
124	240	349	109	4,09	445,97
125	240	358	118	4,09	482,79
126	240	359	119	4,09	486,88
127	240	835	595	3,03	1.801,54
128	500	1311	811	3,03	2.455,54

Trab.	Prazo	Térm.	Ti	Wi	Wi x Ti
129	240	475	235	3,03	711,53
130	240	245	5	3,03	15,14
131	240	115		6,20	
132	240	27		6,20	
133	352	264		6,20	
134	240	620	380	3,03	1.150,56
135	240	589	349	3,03	1.056,70
136	240	77		6,20	
137	240	30		6,20	
138	240	38		6,20	
139	240	11		6,20	
140	240	8		6,20	
141	240	209		4,09	
142	1928	1402		6,20	
143	312	240		6,20	
144	240	237		3,85	
145	240	11		6,20	
146	352	295		6,20	
147	240	765	525	3,03	1.589,59
148	240	810	570	3,03	1.725,84
149	240	98		6,20	
150	240	194		4,09	
151	240	186		4,09	
152	240	198		4,09	
153	240	213		4,09	
154	240	117		4,09	
155	928	837		6,20	
156	240	75		6,20	
157	240	95		6,20	
158	240	136		6,20	
159	240	47		6,20	
160	112	22		5,76	
161	240	60		6,20	
162	240	114		4,09	
163	240	126		4,09	
164	240	230		4,09	
165	240	219		4,09	
166	240	48		4,09	
167	240	285	45	4,09	184,11
168	240	430	190	4,09	777,37
169	240	234		4,09	
170	240	261	21	4,09	85,92
171	240	27		6,20	
172	240	516	276	4,09	1.129,24
173	240	57		3,03	
174	240	483	243	3,03	735,75
175	240	61		4,09	
176	240	141		4,09	
177	240	106		4,09	
178	32	8		6,20	
179	32	18		6,20	
180	240	151		3,85	
181	56	15		6,20	
182	56	21		6,20	
183	896	831		5,76	
184	1120	1003		5,76	
185	240	825	585	3,03	1.771,26
186	240	590	350	3,03	1.059,73
187	20	12		3,85	
188	592	435		6,20	
189	224	79		8,97	
190	192	15		8,97	
191	192	17		8,97	
192	424	385		8,97	
193	232	90		4,09	
194	352	313		4,09	
195	192	45		4,09	
196	232	125		4,09	
197	232	88		4,09	

Trab.	Prazo	Térm.	Ti	Wi	Wi x Ti
198	1184	1052		4,09	
199	192	35		4,09	
200	192	49		4,09	
201	280	306	26	4,09	106,38
202	192	52		4,09	
203	472	717	245	4,09	1.002,40
204	192	45		4,09	
205	192	72		4,09	
206	280	280		4,09	
207	280	305	25	4,09	102,29
208	632	642	10	4,09	40,91
209	280	275		4,09	
210	280	315	35	4,09	143,20
211	424	432	8	4,09	32,73
212	232	113		4,09	
213	192	106		4,09	
214	192	119		4,09	
215	192	123		4,09	
216	392	405	13	4,09	53,19
217	192	129		4,09	
218	192	138		4,09	
219	352	285		4,09	
220	192	154		4,09	
221	280	288	8	4,09	32,73
222	280	253		4,09	
223	392	377		4,09	
224	280	202		4,09	
225	280	286	6	4,09	24,55
226	352	399	47	4,09	192,30
227	352	294		4,09	
228	280	261		4,09	
229	280	270		4,09	
230	352	344		4,09	
231	352	362	10	4,09	40,91
232	568	492		3,03	
233	568	508		3,03	
234	304	169		6,20	
235	904	887		5,76	
236	560	517		4,09	
237	560	537		4,09	
238	560	500		4,09	
239	560	541		4,09	
240	560	547		4,09	
241	560	479		4,09	
242	560	567	7	4,09	28,64
243	560	416		4,09	
244	560	487		4,09	
245	560	555		4,09	
246	328	243		6,20	
247	256	145		8,97	
248	424	374		8,97	
249	424	520	96	3,03	290,67
250	232	179		4,09	
251	1432	1022		5,76	
252	464	360		4,09	
253	440	414		6,20	
254	560	587	27	4,09	110,47
255	632	638	6	4,09	24,55
256	472	436		4,09	
257	464	357		4,09	
258	560	563	3	4,09	12,27
259	560	529		4,09	
260	560	525		4,09	
261	464	364		4,09	
262	464	392		4,09	
263	632	650	18	4,09	73,65
264	472	435		4,09	
265	472	411		4,09	
266	672	664		4,09	

Trab.	Prazo	Térm.	Ti	Wi	Wi x Ti
267	464	376		4,09	
268	704	747	43	4,09	175,93
269	464	350		4,09	
270	464	375		4,09	
271	472	405		4,09	
272	472	423		4,09	
273	424	349		4,09	
274	424	337		4,09	
275	560	593	33	4,09	135,02
276	376	254		6,20	
277	376	310		6,20	
278	376	272		6,20	
279	464	431		4,09	
280	464	410		4,09	
281	576	753	177	3,03	535,92
282	672	591		4,09	
283	896	905	9	4,09	36,82
284	784	760		4,09	
285	736	651		4,09	
286	784	653		4,09	
287	560	491		4,09	
288	472	393		4,09	
289	424	370		3,85	
290	472	432		4,09	
291	864	750		6,20	
292	784	773		4,09	
293	464	415		3,85	
294	784	779		4,09	
295	784	709		4,09	
296	784	659		4,09	
297	784	690		4,09	
298	784	682		4,09	
299	784	735		4,09	
300	784	746		4,09	
301	784	636		4,09	
302	784	656		4,09	
303	784	761		4,09	
304	784	766		4,09	
305	464	384		4,09	
306	752	730		4,09	
307	592	611	19	4,09	77,74
308	960	876		8,97	
309	496	398		6,20	
310	576	633	57	4,09	233,21
311	616	610		4,09	
312	616	580		4,09	
313	616	576		4,09	
314	696	595		4,09	
315	696	643		4,09	
316	696	668		4,09	
317	576	563		4,09	
318	576	539		4,09	
319	808	852	44	4,09	180,02
320	832	854	22	3,03	66,61
321	1184	1088		3,03	
322	1184	1006		3,03	
323	1184	842		3,03	
324	1184	1015		3,03	
325	584	614	30	3,03	90,83
326	560	441		6,20	
327	536	624	88	3,85	339,21
328	1352	1229		3,03	
329	1352	1296		3,03	
330	1352	1270		3,03	
331	1352	1178		3,03	
332	1352	853		3,03	
333	1352	954		3,03	
334	1352	905		3,03	
335	1184	1116		3,03	

Trab.	Prazo	Térm.	Ti	Wi	Wi x Ti
336	864	728		6,20	
337	584	639	55	6,20	340,77
338	1184	1093		3,03	
339	1184	994		3,03	
340	600	896	296	3,03	896,23
341	1184	741		3,03	
342	1184	1031		3,03	
343	1184	926		3,03	
344	1184	942		3,03	
345	1184	981		3,03	
346	1184	831		3,03	
347	1184	761		3,03	
348	1184	1021		3,03	
349	1184	951		3,03	
350	1184	937		3,03	
351	1184	964		3,03	
352	1184	938		3,03	
353	1184	992		3,03	
354	1184	956		3,03	
355	1184	1001		3,03	
356	1184	1019		3,03	
357	1184	1098		3,03	
358	1184	1089		3,03	
359	1184	762		3,03	
360	1184	738		3,03	
361	864	778		6,20	
362	864	837		6,20	
363	864	675		4,09	
364	864	709		4,09	
365	864	847		4,09	
366	864	663		4,09	
367	864	897	33	4,09	135,02
368	864	844		4,09	
369	928	858		4,09	
370	928	725		4,09	
371	928	845		4,09	
372	928	705		4,09	
373	928	895		4,09	
374	928	868		4,09	
375	928	903		4,09	
376	928	860		4,09	
377	928	880		4,09	
378	928	878		4,09	
379	928	851		4,09	
380	928	888		4,09	
381	808	856	48	4,39	210,87
382	1152	953		5,76	
383	984	895		4,09	
384	1024	722		5,76	
385	1264	839		3,03	
386	1304	1309	5	3,03	15,14
387	984	898		6,20	
388	904	701		3,59	
389	1264	1063		3,03	
390	968	951		3,03	
391	1192	1181		3,03	
392	1488	1195		4,09	
393	1152	919		4,09	
394	1152	931		4,09	
395	1152	910		4,09	
396	1152	906		4,09	
397	1288	1165		4,09	
398	1152	931		4,09	
399	1408	1272		4,09	
400	1288	1209		4,09	
401	1368	1194		4,09	
402	1288	1172		4,09	
403	1152	965		4,09	
404	1288	1184		4,09	

Trab.	Prazo	Térm.	Ti	Wi	Wi x Ti
405	1288	1118		4,09	
406	1152	1002		4,09	
407	1088	725		4,09	
408	1040	910		4,09	
409	1456	1069		4,09	
410	1152	1028		4,09	
411	1288	881		4,09	
412	1288	1113		4,09	
413	1288	1215		4,09	
414	1128	1010		4,09	
415	1088	985		4,09	
416	1208	1156		4,09	
417	1288	1104		4,09	
418	896	1083	187	6,20	1.158,63
419	1208	1125		4,09	
420	1288	1189		4,09	
421	1288	1141		4,09	
422	1288	1144		4,09	
423	1040	1092	52	4,09	212,75
424	1128	738		4,09	
425	1288	1136		4,09	
426	1040	1123	83	4,09	339,59
427	1184	1175		3,03	
428	1040	907		4,09	
429	912	710		8,97	
430	1120	1058		3,03	
431	1024	903		4,09	
432	1024	774		4,09	
433	1432	977		3,03	
434	1432	1023		3,03	
435	1096	1135	39	4,09	159,57
436	1136	1127		6,20	
437	1432	964		3,03	
438	1432	1299		3,03	
439	1432	1292		3,03	
440	1432	997		3,03	
441	1432	981		3,03	
442	1144	1000		3,03	
443	1624	1257		5,76	
444	1176	845		5,76	
445	1176	857		5,76	
446	1328	1143		4,09	
447	1432	1185		4,09	
448	1320	1156		4,09	
449	1528	1214		4,09	
450	1192	1057		3,85	
451	1320	1272		4,09	
452	1480	1321		4,09	
453	1480	1078		4,09	
454	1248	1061		4,09	
455	1568	1091		4,09	
456	1320	1184		4,09	
457	1320	1110		4,09	
458	1480	1219		4,09	
459	1320	1204		4,09	
460	1248	1082		4,09	
461	1320	1224		4,09	
462	1248	933		4,09	
463	1248	914		4,09	
464	1416	963		4,09	
465	1512	1274		4,09	
466	1512	1267		4,09	
467	1512	1240		4,09	
468	1512	1205		4,09	
469	1432	1216		3,03	
470	1432	999		3,03	
471	1264	952		4,09	
472	1400	1242		4,09	
473	1512	1103		4,09	

Trab.	Prazo	Térm.	Ti	Wi	Wi x Ti
474	1304	1231		6,20	
475	1632	1110		5,76	
476	1512	1384		4,09	
477	1512	1278		4,09	
478	1232	1232		6,20	
479	1184	1346	162	4,09	662,81
480	1544	1276		6,20	
481	1640	1112		6,20	
482	1528	1328		3,03	
483	1504	1382		3,03	
484	1656	1346		4,09	
485	1656	1164		4,09	
486	1344	1330		6,20	
487	1512	1310		4,09	
488	1656	1332		4,09	
489	1656	1364		4,09	
490	1656	1481		4,09	
491	1656	1404		4,09	
492	1736	1362		4,09	
493	1656	1341		4,09	
494	1656	1356		4,09	
495	1512	1349		4,09	
496	1800	1386		4,09	
497	1736	1407		4,09	
498	1736	1379		4,09	
499	1656	1484		4,09	
500	1656	1386		4,09	
501	1656	1512		4,09	
502	1656	1425		4,09	
503	1656	1392		4,09	
504	1544	1408		3,59	
505	1544	1370		3,59	
506	1544	1436		3,03	
507	1368	1593	225	3,03	681,25
508	1568	1218		3,03	
509	1568	1448		3,03	
510	1568	1458		3,03	
511	1456	1471	15	6,20	92,94
512	1800	1219		3,03	
513	1800	1398		3,03	
514	1800	1404		3,03	
515	1800	1496		3,03	
516	1800	1515		3,03	
517	1800	1419		3,03	
518	1800	1390		3,03	
519	1800	1536		4,09	
520	1800	1514		4,09	
521	1800	1398		4,09	
522	1800	1391		4,09	
523	1800	1367		4,09	
524	1800	1513		4,09	
525	1800	1524		4,09	
526	1800	1538		4,09	
527	1680	1375		3,03	
528	1760	1607		3,03	
529	1800	1518		5,76	
530	1928	1540		3,03	
531	2000	1421		4,09	
532	1920	1463		4,09	
533	1920	1481		4,09	
534	1680	1427		4,09	
535	1680	1525		4,09	
536	1680	1442		4,09	
537	1848	1461		4,09	
538	1920	1543		4,09	
539	1920	1478		4,09	
540	1920	1462		4,09	
541	1920	1543		4,09	
542	1920	1559		4,09	

Trab.	Prazo	Térm.	Ti	Wi	Wi x Ti
543	1920	1641		4,09	
544	1920	1607		4,09	
545	1592	1601	9	4,09	36,82
546	1920	1505		4,09	
547	1920	1510		4,09	
548	1928	1485		8,97	
549	1570	1621	51	3,03	154,42
550	1928	1578		3,03	
551	1800	1641		4,09	
552	1800	1630		4,09	
553	1800	1602		4,09	
554	1800	1578		4,09	
555	2000	2175	175	3,03	529,86
556	2160	1682		4,09	
557	2128	1656		4,09	
558	1800	1625		4,09	
559	1800	1625		4,09	
560	1880	1714		4,09	
561	2128	1679		4,09	
562	2128	1709		4,09	
563	2048	1678		4,09	
564	1880	1671		4,09	
565	2368	1702		4,09	
566	2128	1699		4,09	
567	2016	1705		4,09	
568	2016	1689		4,09	
569	1880	1699		4,09	
570	2016	1704		4,09	
571	1968	1569		4,09	
572	2128	1626		4,09	
573	2160	1755		4,09	
574	1880	1764		4,09	
575	1880	1568		4,09	
576	2048	1575		4,09	
577	1880	1577		4,09	
578	2048	1558		4,09	
579	2160	1671		4,09	
580	2048	1605		4,09	
581	2128	1770		4,09	
582	2128	1772		4,09	
583	2128	1785		4,09	
584	2048	1609		4,09	
585	2500	2322		3,03	
586	2656	1664		3,03	
587	2656	1650		3,03	
588	2160	1589		3,03	
589	2160	1635		3,03	
590	2656	1611		3,03	
591	2160	1779		3,03	
592	2160	1645		3,03	
593	2656	1673		3,03	
594	2160	1622		3,03	
595	2160	1643		3,03	
596	2656	1670		3,03	
597	2160	1630		3,03	
598	2656	1654		3,03	
599	2048	1644		4,09	
600	2048	1653		4,09	
601	2048	1615		4,09	
602	2048	1622		4,09	
603	2048	1891		4,09	
604	2048	1617		4,09	
605	2048	1936		4,09	
606	2048	2058	10	4,09	40,91
607	2048	1971		4,09	
608	1920	1974	54	3,03	163,50
609	2416	2020		3,03	
610	1872	2149	277	3,03	838,70
611	2048	2137	89	4,09	364,14

Trab.	Prazo	Térm.	Ti	Wi	Wi x Ti
612	2048	2179	131	4,09	535,98
613	2048	2186	138	4,09	564,62
614	2048	2087	39	4,09	159,57
615	2048	1674		4,09	
616	2048	2092	44	4,09	180,02
617	2048	2122	74	4,09	302,77
618	2048	2111	63	4,09	257,76
619	2048	2304	256	4,09	1.047,41
620	2048	2124	76	4,09	310,95
621	2048	2233	185	4,09	756,92
622	2048	2167	119	4,09	486,88
623	2048	2186	138	4,09	564,62
624	2048	2225	177	4,09	724,18
625	2048	2196	148	4,09	605,53
626	2048	2248	200	4,09	818,29
627	2048	2207	159	4,09	650,54
628	2048	2217	169	4,09	691,45
629	2048	1721		4,09	
630	2048	1708		4,09	
631	2088	2430	342	3,03	1.035,51

