

**APLICAÇÃO DE UM ALGORITMO GENÉTICO NO
SEQUENCIAMENTO MULTIOBJETIVO DE ORDENS DE PRODUÇÃO
DE UM SISTEMA SOB ENCOMENDA**

RAUL DE SOUZA BRANDÃO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

MAIO - 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**APLICAÇÃO DE UM ALGORITMO GENÉTICO NO SEQUENCIAMENTO
MULTIOBJETIVO DE ORDENS DE PRODUÇÃO DE UM SISTEMA SOB
ENCOMENDA**

RAUL DE SOUZA BRANDÃO

“Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como parte
das exigências para obtenção do título de
Mestre em Engenharia de Produção”.

Orientadora: Prof^a. Jacqueline Magalhães Rangel Cortes, D. Sc.

Campos dos Goytacazes – RJ

Maio – 2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

23/2009

Brandão, Raul de Souza

Aplicação de um algoritmo genético no sequenciamento multiobjetivo de ordens de produção de um sistema sob encomenda / Raul de Souza Brandão. – Campos dos Goytacazes, 2009.

xii, 105 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia de Produção. Campos dos Goytacazes, 2009.

Orientadora: Jacqueline Magalhães Rangel Cortes.

Área de concentração: Pesquisa operacional.

Bibliografia: f. 91-95.

1. Algoritmo genético multiobjetivo 2. Produção sob encomenda 3. Sequenciamento de ordens de produção I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia de Produção II. Título

CDD 511.80685

**APLICAÇÃO DE UM ALGORITMO GENÉTICO NO SEQUENCIAMENTO
MULTIOBJETIVO DE ORDENS DE PRODUÇÃO DE UM SISTEMA SOB
ENCOMENDA**

RAUL DE SOUZA BRANDÃO

“Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia, da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como parte
das exigências para obtenção do título de
Mestre em Engenharia de Produção”.

Aprovada em 29 de maio de 2009

Comissão Examinadora

Prof. Dalessandro Soares Vianna, D.Sc. – UCAM/IFF

Prof. Rogério Atem de Carvalho, D.Sc. – IFF/UENF

Prof. Geraldo Galdino de Paula Junior, D.Sc. – UENF

Prof^a. Jacqueline Magalhães Rangel Cortes, D.Sc. UENF (Orientadora)

A todos os estudantes que buscam desenvolver conhecimentos acadêmicos para aplicações em pesquisa aplicada.

AGRADECIMENTOS

A Pábola minha esposa pela compreensão e apoio em todos os momentos.

A Marcelo, Dayselane, Renata e Fernanda pela colaboração e apoio.

A todos os colegas do Laboratório de Engenharia de Produção.

Aos professores Galdino, Arica, Gudelia, Rogério e Alcimar pelos valerosos conhecimentos transmitidos.

Ao professor Dalessandro pelo prestígio.

A UENF, pela oportunidade.

A DJM pelas informações disponibilizadas.

A Capes pelo apoio financeiro.

A todos que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

“O único modo de evitar os erros é adquirindo experiência, mas a única maneira de adquirir experiência é cometendo erros”. De autor desconhecido

“A teoria sem a prática é enganosa, mas a prática sem a teoria é cega”.
De autor desconhecido

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um Algoritmo Genético Multiobjetivo aplicado a um sistema real de produção, para sequenciamento de Ordens de Produção. Para implementação foi realizada uma pesquisa explanatória sobre o modo de sequenciamento das Ordens de Produção atual, visando criar futuramente uma ferramenta computacional que possa auxiliar nas tomadas decisórias desse sistema. Basicamente, a pesquisa reflete uma abordagem de tratamento de sequências de Ordens Produtivas de um sistema de produção baseado na demanda sob encomenda. O documento promove a criação de diversos cenários de sequenciamento afim de facilitar ao agente decisor em seu julgamento. São utilizados cinco objetivos a serem minimizados sendo um objetivo baseado em uma função ponderada dos demais, são eles: custo de produção; caminho crítico; custo com atrasos; tempo de configuração. Os métodos utilizados para esta pesquisa caracterizam-se em um estudo de caso realizado no sistema de produção e o desenvolvimento de um Algoritmo para tratamento do problema. O estudo permitiu concluir que se faz necessário o uso de técnicas para melhorar o sequenciamento da produção na empresa, que atualmente não disponibiliza de nenhuma ferramenta de auxílio.

Palavras-chave: Algoritmo Genético Multiobjetivo, Produção Sob Encomenda, Sequenciamento de Ordens de Produção.

ABSTRACT

This paper presents the development of a Multiobjective Genetic Algorithm applied to a real through system production, aiming to improve the sequencing of production orders. Deployment was carried out through explanatory research on how to sequence the current orders production aiming, to create a future computational tool that can support decision taken in this system. Basically, the survey reflects a treatment of sequences of Production Orders of a production system based on demand (job shop). The document promotes the creation of various scenarios in order to facilitate sequencing of the official decision on its testing. Four goals were used to be minimized and a goal based on a weighted function of the other, they are: cost of production; makespan; cost of delays; and setup time. The methods used to characterize this research was a case study conducted in the production system and the development an Algorithm for treating of the problem. The study concluded that it is necessary the use of techniques to improve the sequencing of production in the company, which currently does not provide any tool to help.

Keywords: Multiobjective Genetic Algorithm, Job Shop Production, Poduction orders sequencing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Ciclos do Sistema de Produção	07
Figura 2.2 – Parte dos dados técnicos de um pedido de fabricação para uma Ponte Rolante	08
Figura 2.3 - Desenho da roda (componente do truque da Ponte Rolante) código Tr10	09
Figura 2.4 – Exemplo de parte de desenho de montagem de uma ponte rolante	09
Figura 2.5 – Lista de produtos e materiais para um truque de Ponte Rolante	10
Figura 2.6 – Ordens de Produção	11
Figura 2.7 – Foto de Ponte Rolante embalada para carregamento	12
Figura 2.8 – Máquinas disponíveis no sistema produtivo	14
Figura 2.9 – Tarefas realizadas no sistema produtivo	14
Figura 2.10 – Relação entre as máquinas e tarefas do sistema produtivo	15
Figura 2.11 – Sequência de produção da Roda (Tr10) item do projeto Truque de Ponte Rolante	17
Figura 2.12 – Tempo das sequências de produção para componente Tr10	17
Figura 2.13 – Cronograma de produção semanal para o Torno	18
Figura 3.1 – Identificação do gargalo em um processo produtivo	22
Figura 3.2 – Sistema de produção puxado	23
Figura 3.3 – Sistema de controle da produção CONWIP. Fluxo de materiais mostrado em azul e fluxo de informação(cartão) mostrado em verde (BONVIK, 1999 <i>apud</i> BARCO e VILELA, 2008)	24
Figura 3.4 – Sistema com todas as operações sendo gargalos	28
Figura 3.5 – Sequenciamento baseado no lucro unitário	29
Figura 3.6 – Sequenciamento baseado no prazo de entrega	29
Figura 3.7 – Evolução dos modelos de produção (PEROBA, 2007)	32
Figura 4.1 – Representações básicas de cromossomos	34
Figura 4.2 – Representação de cruzamento de cromossomos em um ponto	36
Figura 4.3 – Representação de cruzamento de cromossomos multipontos	37
Figura 4.4 – Representação de cruzamento de cromossomos uniforme	37
Figura 4.5 – Mutação de cromossomo por substituição de valores	38
Figura 4.6 – Mutação de cromossomo por troca de posições	38

Figura 4.7 – Algoritmo genético básico	42
Figura 5.1 – Problema Clássico de Otimização (CASTRO, 2001)	48
Figura 5.2 – Fronteira de Pareto (soluções não-dominadas do problema)	51
Figura 5.3 – Soluções Elite (soluções não-dominadas encontradas)	52
Figura 6.1 – Fluxograma básico do algoritmo genético proposto	58
Figura 6.2 – Procedimento de geração da população inicial	59
Figura 6.3 – Função de Avaliação	60
Figura 6.4 – Função Torneio	61
Figura 6.5 – Representação gráfica da Função Torneio	61
Figura 6.6 – Função de Aptidão	62
Figura 6.7 – <i>Interface</i> do Algoritmo de Escalonamento da Produção Sob Encomenda (AEPSE)	63
Figura 7.1 – Cenário Real de Produção 1	65
Figura 7.2 – Sequência de produção do Cenário Real de Produção 1	66
Figura 7.3 – Dados de entrada	67
Figura 7.4 – Dados de entrada em formato de sequenciamento	67
Figura 7.5 – Exemplo de cromossomo com distribuição aleatória de tarefas para o Torno	67
Figura 7.6 – Cromossomo com distribuição de tarefas após mutações de posição	68
Figura 7.7 – Exemplo de solução válida	70
Figura 7.8 – Exemplo de solução inválida	70
Figura 7.9 – Exemplo de filhos gerados por cruzamento de um ponto	73
Figura 7.10 – Exemplo de filhos gerados se não ocorrer cruzamento	75
Figura 7.11 – Mutação no cromossomo	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tempos de <i>Setup</i> para as tarefas do Torno A	16
Tabela 3.1 – Produtos a serem fabricados	29
Tabela 7.1 – Exemplo de cromossomos para 3 Ops sem <i>Setup</i> e restrição de precedência	72
Tabela 8.1 – Parâmetros do Algoritmo	77
Tabela 8.2 – Testes para definição da probabilidade de cruzamento	79
Tabela 8.3 – Testes para definição da probabilidade de mutação	80
Tabela 8.4 – Testes para verificação da evolução das soluções	81
Tabela 8.5 – Testes para verificação da influencia do tamanho da população	81
Tabela 8.6 – Testes com tamanho da população e probabilidade de mutação	82
Tabela 8.7 – Testes para definir os melhores parâmetros do primeiro cenário	83
Tabela 8.8 – Testes para definir os melhores parâmetros do segundo cenário	83
Tabela 8.9 – Testes finais do primeiro cenário	84
Tabela 8.10 – Testes finais do segundo cenário	84
Tabela 8.11 – Comparações dos resultados do cenário 1	84
Tabela 8.12 – Comparações dos resultados do cenário 2	86

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
LISTA DE TABELAS	xii
Capítulo 1 – Introdução	01
1.1 – Objetivos	02
1.2 – Relevância	03
1.3 – Estrutura da Dissertação	04
Capítulo 2 – O Sistema de Produção	06
2.1 – O Setor de Usinagem e suas Características	13
Capítulo 3 – Planejamento e Controle da Produção	19
3.1 – Escalonamento de Tarefas <i>Job Shop Scheduling</i>	24
3.2 – Regras de Prioridade	28
3.3 – Medidas de Desempenho	30
3.4 – Importância do PCP	31
Capítulo 4 – Algoritmos Genéticos	33
4.1 – Conceitos Básicos	33
4.1.1 – Representação do Cromossomo	33
4.1.2 – Operadores Genéticos	34
4.1.2.1 – Seleção	34
4.1.2.2 – Cruzamento (<i>Crossover</i>)	35
4.1.2.3 – Mutação	37
4.1.2.4 – Elitismo	39
4.1.3 – Medidas de Desempenho	39
4.1.3.1 – Avaliação	40
4.1.3.2 – Aptidão	40
4.1.3.3 – Problemas com Restrições	41
4.1.4 – Funcionamento do Algoritmo Genético	42
4.2 – Definições	43
4.3 – Estado da Arte	45
4.3.1 – Algoritmos Genéticos para Problemas Multiobjetivo	46

Capítulo 5 – Otimização e Programação Multiobjetivo	48
5.1 – Definições	48
5.1.1 – Otimização Simples x Otimização Multiobjetivo	49
5.2 – Exemplos de Problemas Multiobjetivo	49
5.3 – Análise e Decisão Multiobjetivo	50
5.4 – Métodos para Problemas Multiobjetivo	53
5.5 – Critérios Alternativos para Problemas Multiobjetivo	54
Capítulo 6 – O Algoritmo Proposto	57
6.1 – Funcionalidades do Algoritmo	58
6.2 – <i>Interface</i> Gráfica do Algoritmo	63
6.3 – Variáveis e Parâmetros do Algoritmo	64
Capítulo 7 – Aplicação do Algoritmo	65
7.1 – Representação do Cromossomo	66
7.2 – Função de Avaliação	69
7.3 – Geração dos Cromossomos Iniciais	71
7.4 – Cruzamento e Geração de Descendentes	73
7.5 – Função de Aptidão	75
7.6 – Função Torneio	76
Capítulo 8 – Testes e Resultados	77
8.1 – Parâmetros Disponíveis	77
8.2 – Recursos de <i>Software</i>	77
8.3 – Recursos de <i>Hardware</i>	78
8.4 – Dados do Sistema de Produção	78
8.5 – Testes	78
8.5.1 – Testes para Definição de Parâmetros	79
8.5.2 – Testes Finais	83
8.6 – Resultados	84
Capítulo 9 – Conclusões e Trabalhos Futuros	88
9.1 – Conclusões	88
9.2 – Trabalhos Futuros	89
Referências	91
Anexos	96
Anexo A – Reportagem sobre o homem mais alto do mundo	97

Apêndices	98
Apêndice A – Melhores cromossomos encontrados nos testes do Cenário 1	99
Apêndice B – Melhores cromossomos encontrados nos testes do Cenário 2	100
Apêndice C – CD com dados dos testes computacionais	102
Apêndice D – Tabela com dados reais dos cenários aplicados	103
Glossário	104

Capítulo 1 – Introdução

“Neste capítulo será apresentada uma visão geral deste trabalho.”

Os estudos voltados para otimização na programação da produção são de grande importância na pesquisa operacional. Problemas de sequenciamento encontram-se intimamente ligados ao planejamento e controle da produção (PCP) nas indústrias (RAVETTI, 2003). Sistemas que trabalham com produção sob encomenda (*Job Shop*) promovem um desafio grande aos estudiosos do assunto. Os estudos deste trabalho têm foco direcionado para melhoria da produção de um sistema real com demanda sob encomenda.

A produção de uma empresa do ramo de metalurgia, com atividade industrial de produção em lotes individuais ou de baixa demanda, é base para estudos da aplicação real. Esse tipo de atividade industrial com lotes menores que 50 peças, é muito importante para a economia de um país, pois segundo Groover (1987) e Ghosh (1987) ela é responsável pela maior parte dos produtos manufaturados na indústria.

O sistema real tratado na pesquisa não provê *software* para distribuição e controle das tarefas. Este estudo busca conhecer a problemática real e suas respectivas expectativas. Onde se pretende realizar o desenvolvimento futuro de uma ferramenta computacional, que possibilite aplicação do Algoritmo Genético na resolução satisfatória do sequenciamento da produção com múltiplos objetivos.

Atualmente, além da má distribuição das tarefas, são encontradas diversas ocorrências que dificultam a organização do sistema produtivo. São elas: dificuldades em determinar prazo de entrega dos produtos; problemas de manutenção não programada das máquinas; gargalos de produção desconhecidos previamente; falta de matéria prima; desperdício de *setup*; replanejamento excessivo dos processos e demandas emergenciais.

A base da economia de uma sociedade é a sua capacidade de transformação dos recursos de Capital, Material e Humano em bens e serviços com maior valor (MONKS, 1987). As melhorias na produção promovem o avanço na capacidade de

uma empresa competir no mercado, pois possibilitam conhecer mais intimamente sua capacidade de transformação e ajuda a reduzir custos e melhorar a qualidade dos produtos.

A relativa necessidade de tomadas decisórias em um ambiente produtivo é notada no cotidiano das empresas, seja ela de qualquer tipo de atividade industrial ou até mesmo prestadoras de serviços. Isto ocorre pelas necessárias intervenções internas ou externas da produção, e pelos devidos replanejamentos seja por datas de entrega ou por novos pedidos, o que pode alterar o tempo de realização das tarefas (CURY, 1999).

Os estudos de melhoria no desempenho produtivo são gerados de maneira a planejar adequadamente os sistemas e propiciar uma redução de custos nas empresas. Entende-se como importante a medição e avaliação dos objetivos de desempenho da produção (GODINHO, 2004).

1.1 – Objetivos

Objetivo Geral:

Desenvolver uma heurística para uma futura ferramenta computacional de auxílio à tomada de decisão em ambientes produtivos industriais com produção baseada sob encomenda.

Objetivos Específicos:

Desenvolver um Algoritmo Genético para auxiliar a resolução do problema de sequenciamento da produção sob encomenda e com múltiplos objetivos a serem conquistados. Estudo destinado a uma aplicação de caso real.

Dentre os diversos objetivos deste sistema de produção, alguns se caracterizam como fundamentais para o bom funcionamento do mesmo. Então o foco dessa pesquisa consiste em tratar a resolução de apenas quatro destes objetivos. Os objetivos do problema são:

- a) Minimização do tempo de preparação (*Setup*);
- b) Minimização do tempo máximo de produção (Caminho crítico);
- c) Minimização dos custos empregados a produção;
- d) Minimização do custo relativo a atrasos.

1.2 – Relevância

Em tempos atuais, vive-se um ambiente de extrema competição entre as empresas, fruto desta globalização da economia, que exorbita tudo quanto se viu antes na história humana. Em tempos onde a informação se torna objeto competitivo, as organizações modernas buscam cada vez mais conhecer sua própria capacidade de desenvolvimento para antever a dinâmica da evolução.

As conjunturas de mercado em que as empresas convivem, promovem um atentamento exarcebado aos dados e informações necessárias ao conhecimento e acompanhamento de sua realidade produtiva e econômica. Os dados extraídos de procedimentos de estudo da realidade produtiva servem de subsídio para formulação de políticas para desenvolvimento da produção na empresa com vistas ao crescimento econômico, em base sustentável.

A divulgação dos estudos aqui apresentados poderá gerar uma atração na aplicação de empresas similares, tanto do Estado como a nível nacional, com a conseqüente otimização da produção que possibilita a redução de custos, que diretamente influencia no desenvolvimento da empresa. Como a redução dos desperdícios, ocasionalmente, provocam aumento de lucros, poderá haver crescimento das empresas e novos postos de trabalho. Prática que diretamente proporciona melhoria na renda familiar das regiões atendidas pelas empresas, o que promove o desenvolvimento local e sustentável.

Essa é a motivação principal do estudo, já que a cidadania é ampliada, uma vez que possibilita aos empresários o acesso a informações que sirvam de subsídio para geração de melhorias na competitividade de mercado, fortalecendo o crescimento, visando o bem-estar da sociedade envolvida. Também é uma grande motivação aplicar conhecimentos acadêmicos e testá-los na prática, ou seja, aplicar em casos reais os estudos adquiridos.

Deve ser considerada, ainda, a importância de se unir técnicas de Engenharia de Produção, que tratam de interpretar a lógica de processos para decisão otimizada da produção e que buscam não só a sobrevivência da empresa, mas também o desenvolvimento dos municípios interioranos. O desenvolvimento de tais processos está diretamente ligado à experiência dos decisores que precisam tomar decisões

relacionadas à distribuição das tarefas em suas organizações e que estarão satisfeitos com recursos adicionais, que podem ajudar a realizar as mesmas de maneira manual, isto é, um mecanismo que pode auxiliar as decisões tomadas.

Como qualquer tipo de organismo vivo, as empresas estão em permanente estado de transição, de transformação, buscando a sua própria sobrevivência (MARTINS, 2000). Obrigando uma administração a voltar-se para a mutação em seus métodos, processos, serviços e produtos, em benefício da capacidade de adaptação e da subsistência, o que conota certo conceito de darwinismo, que aqui será tratado de maneira diferenciada, por razões distintas (MARTINS, 2000).

A razão pela qual este estudo foi realizado consiste no fortalecimento de uma grande atividade industrial de produção, voltada a pequenos lotes de produtos, que, como dito anteriormente, tem importância fundamental na economia mundial, promovendo uma abrangência de aplicação diversificada nas empresas.

1.3 – Estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se dividida em 9 capítulos. O presente capítulo apresenta uma visão geral do problema em estudo, objetivos da pesquisa e a organização global da dissertação. No capítulo 2 são explicitadas as características e condições atuais do sistema de produção estudado.

No capítulo 3 está caracterizado o funcionamento do planejamento e controle da produção, suas funções básicas e sua contribuição para um sistema de produção. Também é apresentada a importância crescente em sistemas de produção caracterizado como “sob encomenda”.

O capítulo 4 aborda os conceitos e aplicações de Algoritmos Genéticos, que foi uma técnica utilizada neste estudo para desenvolvimento de uma ferramenta que possa auxiliar a melhoria deste sistema de produção aqui caracterizado. É, ainda, exposto o estado da arte da aplicação desta técnica aqui também estudada.

No capítulo 5 apresentam-se os conceitos das necessidades de utilizar-se de múltiplos objetivos e as dificuldades encontradas neste tipo de metodologia. Característica que se aproxima bastante da realidade de qualquer sistema de

produção, onde não somente um objetivo deve ser satisfeito, pois vários outros devem estar em equilíbrio para o sistema funcionar de maneira adequada.

O capítulo 6 contém a descrição do Algoritmo desenvolvido, apresentando suas funcionalidades, sua interpretação gráfica dos elementos do sistema de produção e também as características do algoritmo implementado para resolução do problema proposto nesta pesquisa.

No capítulo 7 é descrito detalhadamente o estudo de caso aplicado ao sistema de produção, onde são apresentados os dados de entrada do Algoritmo, para que possam ser realizadas simulações do mesmo. No capítulo 8 é discorrido sobre os testes e resultados dos experimentos computacionais cumpridos com a ferramenta desenvolvida.

Finalmente, as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros são sumariadas no capítulo 9. É, ainda, efetuada uma ligação dos resultados aos objetivos propostos na pesquisa, onde são resumidas as contribuições para a investigação e apresentadas sugestões de pesquisas futuras.

Capítulo 2 – O sistema de produção

“Neste capítulo será apresentada uma descrição do funcionamento do sistema de produção.”

O direcionamento da pesquisa apresentada neste documento está embasado em um estudo de um problema real, onde o desejo de melhorar um ambiente de produção é iminente. Estudo esse, que procura demonstrar um sistema de produção sob encomenda de uma empresa fabricante de equipamentos para beneficiamento do mármore e granito (relevância local) e também equipamentos para elevação e transporte de cargas (relevância nacional).

A DJM Indústria e Comércio Ltda, situada na cidade de Cachoeiro de Itapemirim no estado do Espírito Santo, serve como referência para pesquisa e aplicação das técnicas desenvolvidas neste trabalho. Essa empresa possui influência em sua produção voltada para as necessidades da região e também de âmbito nacional. A região onde está instalada a empresa tem características marcantes de extração e beneficiamento de rochas ornamentais, isto é, necessita de máquinas e equipamentos para tal atividade.

A extração e beneficiamento de rochas ornamentais é a principal atividade econômica da região, sendo destaque nacional nesse setor. O Estado do Espírito Santo é o principal produtor de rochas ornamentais no Brasil, respondendo por aproximadamente 47% do total da produção de rochas extraídas. Os pólos que possuem o maior número de Teares para corte do Mármore e Granito no Brasil são respectivamente Cachoeiro de Itapemirim, São Paulo e Rio de Janeiro (NERY e SILVA, 2001). Os Teares são alguns dos equipamentos fabricados pela DJM direcionados para esse setor.

Os desafios reais encontrados no estudo, consistem no problema de sequenciamento em sistema de produção sob encomenda. Para Palomino (2001), o que caracteriza esse tipo de sistema são os tamanhos reduzidos dos lotes de manufatura onde o volume de produção é baixo (conhecido na literatura como produção individual (MOREIRA, 1993)), ou seja, o sistema produtivo que é utilizado para atender as necessidades específicas dos clientes.

Objetivando aumentar seus lucros e melhorar cada vez mais suas condições competitivas no mercado, as empresas buscam sempre o atendimento cada vez mais exclusivo às necessidades dos clientes. O motivo deste comportamento é devido ao fato das condições especiais de atendimento ao cliente serem de fundamental importância para os mesmos e existem poucas empresas especializadas nesse tipo de atendimento.

A Figura 2.1 demonstra os ciclos do sistema de produção (etapas do processo produtivo) e suas características. Nessa Figura se pode observar o funcionamento contínuo desse sistema de produção.

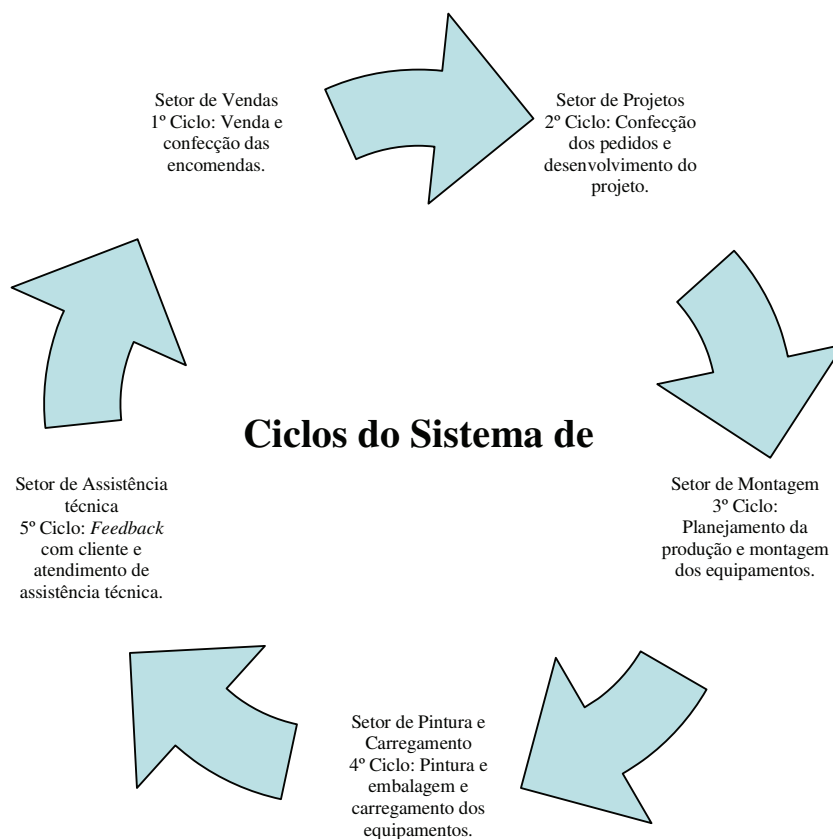


Figura 2.1 – Ciclos do Sistema de Produção.

O primeiro ciclo é a venda, a qual se caracteriza quando a negociação entre o setor de Vendas da empresa e o Cliente geram uma solicitação capaz de ser atendida pela empresa e viável economicamente para ambas as partes. Com isso inicia-se o processo de fabricação com a geração da encomenda a ser enviada ao setor de Projetos. Logo, as seguintes informações tornam-se essenciais para o

prosseguimento dos processos produtivos: características técnicas e prazo de entrega. Nesse momento termina o primeiro ciclo de produção.

O pedido é iniciado pelo setor de Projetos que é responsável pelo desenvolvimento e personalização dos produtos a serem fabricados e também pela interpretação da encomenda, transformando-as em pedidos para o setor de Montagem dos produtos. Esses pedidos são sempre desenvolvidos atendendo as características técnicas da solicitação dos clientes e das normas vigentes. Quando ocorrem divergências entre solicitação e normas, existe uma adequação da solicitação a norma.

A seguir, o setor de Montagem recebe os pedidos de fabricação dos equipamentos repassados pelo setor de Projetos. Constam nos pedidos: folha de dados técnicos; desenhos de Usinagem e Montagem; e as listas de materiais. A Figura 2.2 representa uma parte de um pedido de fabricação de uma ponte rolante, onde constam somente os dados técnicos do equipamento.

DJM	FABRICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS		código	
			FO - PRO - 003	
		folha	revisão	
		04/05	02	
DADOS TÉCNICOS (Truque)				
Capacidade:	<u>12,5</u> ton	Qtd de Vigas	Univiga	
Cliente:	<u>EMPRESA X</u>	Emissão:	14/07/2008	Voltagem
Data Pedido:	<u>11/07/2008</u>	PONTE ROLANTE INTERNA		380 V
Data Entrega:	<u>09/10/2008</u>	Veloc. Elev.	3,97	Cor da viga:
				Amarelo Segurança 5Y8/12
				Cor do Truque:
				Azul
Classificação na NBR 8400				
	Grupo de Estrutura	3		
	Grupo de Mecanismos	2M		
Características Específicas				
	Vão Útil	18,950	mm	
	Altura útil de Elevação	7,00	m	
	Curso do gancho	9,00	m	
Características do Equipamento				
Engrenagens				
	2 un. - Coroa: Material: Aço SAE 1045; Dentes (Z) : 44; Diâmetro Externo: 230; Módulo: 5; Perfil: Dente reto			
	2 un. - Pinhão: Aço SAE: 4140; Dentes (Z) : 18; Diâmetro Externo: 100; Módulo: 5; Perfil: Dente reto			
Rodas				
	4 un. - Tipo: BiFlangeadas; Diâmetro de pista: 250; Largura da pista: 70; Material: Aço Sae 1020; Tratamento: Cementação e Tempera.			
Redutor e Motor				
	2 un. - Modelo: K-100; Redução 1:30; Eixo: oco (vazado); Fixação: pela carcaça			
	2 un. - Motor tipo: Alto rendimento; Potencia: 4 cv; Rotação: 1750 (4 pólos); Forma construtiva B5D; Grau de proteção IP55			
Sensores e Inversores				
	4 un. - Sensor limitador de curso ótico			
	1 un. - Inversor de frequência de 10A			
Rolamentos, Retentores e Travas				
	8 un. - 21312 W33, Folga C3	mancal da roda		
	6 un. - Trava I-90	mancal da roda		
	4 un. - Trava E-58	eixo da roda		
	10 un. - Retentor 60x80x10 BRG	tampa do mancal		

Figura 2.2 – Parte dos dados técnicos de um pedido de fabricação para uma Ponte Rolante.

Além das informações técnicas que foram demonstradas na Figura 2.2, são também enviados os desenhos dos componentes a serem fabricados e montados conforme o projeto do equipamento. A Figura 2.3 demonstra um desenho de usinagem do componente roda que teve algumas características apresentadas na Figura 2.2; esse componente será montado na Ponte Rolante para um determinado cliente (empresa X). O desenho de montagem da Ponte Rolante, representa esse e demais componentes que são descritos na Figura 2.4.

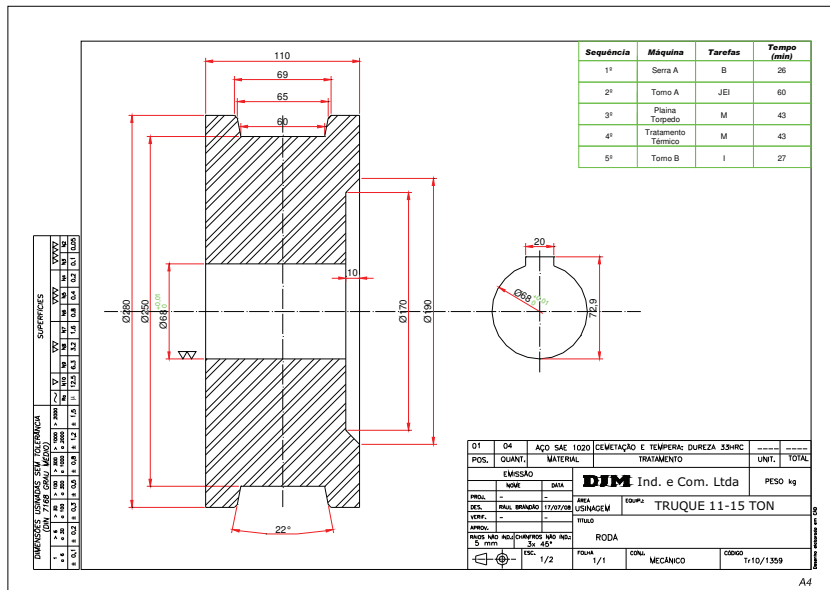


Figura 2.3 - Desenho da roda (componente do truque da Ponte Rolante) código Tr10.

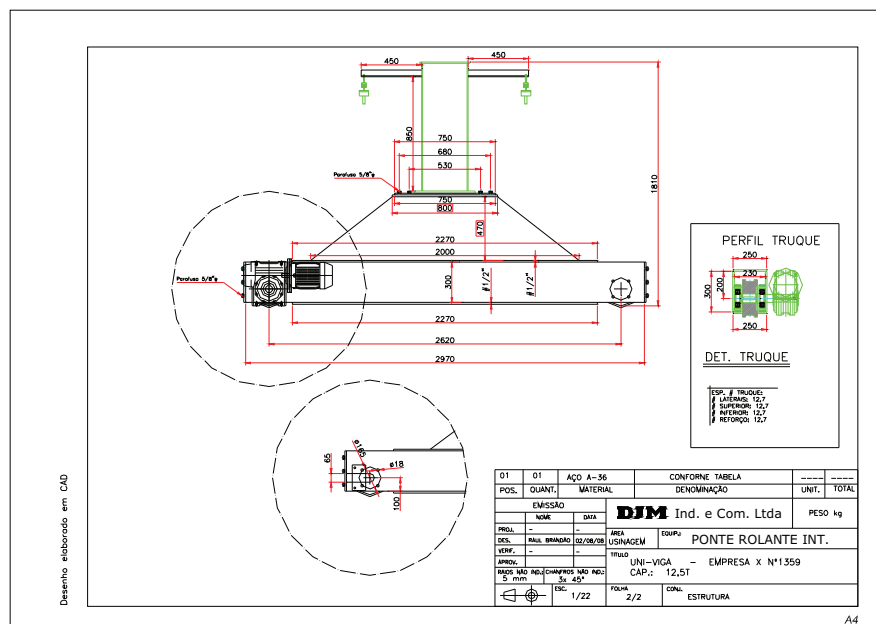


Figura 2.4 – Exemplo de parte de desenho de montagem de uma ponte rolante.

A Figura 2.5 apresenta a lista de produtos e materiais necessários para fabricação do equipamento Ponte Rolante. Nela constam os componentes a serem fabricados e seus respectivos insumos necessários são descritos nos seus respectivos desenhos (exemplo: Figura 2.3). Também são encontrados os componentes de mercado nesta lista, que só fazem parte do escopo de montagem (itens da coluna Setor descritos como Comercial), não sendo necessário então nenhum trabalho de usinagem nos mesmos.

DJM		CHECK LIST DE MATERIAIS		código	
				FO – PRO – 004	
		folha	revisão		
		01/02	01		
Equipamento: Ponte Rolante		Conjunto: Truque			
Cliente: Empresa X		Aplicação: Metalurgia			
Capacidade: 12,5 ton		Prazo: 8/10/2008			
Quant.	Setor	Descrição dos componentes	Código	Estoque	
2	Usinagem	Braço de anti-impacto	Tr01		
2	Usinagem	Bucha do braço de anti-impacto	Tr02		
2	Usinagem	Capa da bucha do braço de anti-impacto	Tr03		
2	Usinagem	Coroa Z-44	Tr04		
2	Usinagem	Eixo conduzido	Tr05		
2	Usinagem	Eixo motriz	Tr06		
1	Comercial	Inversor	10A		
6	Usinagem	Mancal de translação A	Tr07		
2	Usinagem	Mancal de translação B	Tr08		
2	Comercial	Motor Tipo: Alto rendimento; Pot.: 4 cv; Rotação 1750; Const.: BSD; Prot: IP 55			
2	Usinagem	Pinhão Z-18	Tr09		
2	Comercial	Redutor K-100; Redução: 1:60; Eixo: oco (Vazado); Fixação: pela carcaça			
10	Comercial	Retentor	60x80x10 BRG		
4	Usinagem	Roda [temperada]	Tr10		
8	Comercial	Rolamento	21312 W33		
4	Comercial	Sensor limitador de curso	ótico		
2	Usinagem	Tampa do mancal eixo motriz	Tr11		
2	Comercial	Trava	E-58		
6	Comercial	Trava	I-90		

Figura 2.5 – Lista de produtos e materiais para um truque de Ponte Rolante.

Observe que na Figura 2.5 não houve preenchimento do estoque, pois o setor de Montagem é responsável por esta verificação, que fará o preenchimento e irá separar os componentes encontrados para esse projeto, caso não conste no estoque, será comprado ou fabricado.

O planejamento é realizado após o setor de Montagem recebe todos os dados necessários para realização de suas tarefas. São verificados os insumos e componentes em estoques e comparados com as quantidades de solicitações dos pedidos. Então são geradas as ordens de compras e ordens de produção (OPs) de componentes de usinagem. Na Figura 2.6 é apresentada uma solicitação dos

componentes a serem fabricados na Usinagem e que são necessários para o setor de Montagem.

A Usinagem é um subsetor pertencente ao Setor de Montagem. É no setor de usinagem que a pesquisa pretende otimizar o processo de sequenciamento de tarefas. A complexidade desta etapa torna-se evidente devido às características que podem ser observadas na Figura 2.6. Algumas delas são: recebimento dos componentes de diversos projetos ao mesmo tempo pelo setor; prazos de entrega dos componentes bastante variados e tarefas a serem realizadas com precedência de sequenciamento. Essa Figura mostra os componentes (peças) a serem fabricados que não foram encontrados no estoque da empresa e que possuem insumos disponíveis para fabricação na semana.

DJM		ORDENS DE PRODUÇÃO					código FO – PRO – 005	
							folha 01/01	revisão 00
Início do sequenciamento: Segunda-feira 15/9/2008								
1º Projeto Truque de ponte rolante						Código: 1359		
Quant.	Descrição do componente	Precedência	Tar. M1	Tempo M1	Tar. M2	Tempo M2	Código	Prazo
1	Bucha do braço de anti-impacto	1	JG	33 min	LM	40 min	Tr02	2520 min
2	Eixo conduzido	3	FJF	28 min	-	x	Tr05	2700 min
2	Eixo motriz	1	FJFK	37 min	L	25 min	Tr06	2700 min
5	Mancal de translação A	1	FJFG	54 min	M	20 min	Tr07	1140 min
2	Mancal de translação B	1	FJFG	45 min	M	23 min	Tr08	1140 min
4	Roda [temperada]	3	FJFG	60 min	-	x	Tr10	300 min
2º Projeto Carro de ponte rolante						Código: 1359		
Quant.	Descrição do componente	Precedência	Tarefas	Tempo M1	Tar. M2	Tempo M2	Código	Prazo
3	Bucha do suporte de manobra	1	JG	22 min	L	15 min	Cp01	900 min
4	Eixo de sustentação	3	JH	27 min	-	x	Cp05	1200 min
1	Flange do tambor	1	J	65 min	L	25 min	Cp11	1800 min
1	Gancho	2	HJE	45 min	N	10 min	Cp17	600 min
4	Mancal da roda	1	FJFG	38 min	LM	27 min	Cp22	900 min
2	Pinhão Z=18	3	JGF	33 min	-	x	Cp25	300 min
4	Roda	3	FJFG	45 min	-	x	Cp27	360 min
6	Roldanas	3	JFGJ	55 min	-	x	Cp28	600 min
1	Tambor	1	FH	180 min	ML	30 min	Cp31	1800 min
3º Projeto Tear Ômega IV						Código: 1354		
Quant.	Descrição do componente	Precedência	Tarefas	Tempo M1	Tar. M2	Tempo M2	Código	Prazo
6	Caixa de transmissão	0	GJ	75 min	MO	36 min	To08	2400 min
2	Eixo da bateria	2	JF	300 min	L	180 min	To13	2100 min
1	Mancal de bateria grande	4	-	x	NO	1500 min	To28	1980 min
4	Munheca inferior	0	FJ	60 min	M	43 min	To43	300 min
7	Roda do chuvaire	3	FJFG	25 min	-	x	To67	600 min
4º Projeto Tear Ômega Super						Código: 1363		
Quant.	Descrição do componente	Precedência	Tarefas	Tempo M1	Tar. M2	Tempo M2	Código	Prazo
1	Braço	4	-	x	NO	180 min	Ts06	2520 min
3	Coluna	4	-	x	MLON	360 min	Ts16	1500 min
6	Eixo da transmissão	1	JF	20 min	L	25 min	Ts20	1500 min
1	Estrutura de engate	4	-	x	OM	90 min	Ts25	1200 min
3	Fuso	1	JH	120 min	-	X	Ts28	1500 min
2	Munheca inferior	0	FJ	85 min	M	50 min	Ts43	420 min
3	Munheca superior	0	JG	95 min	M	35 min	Ts44	420 min
3	Ponteira do leque	3	JF	75 min	-	x	Ts58	2520 min
9	Porca de fuso	1	GI	50 min	M	20 min	Ts71	1500 min

Figura 2.6 – Ordens de Produção.

A pintura, é etapa final do processo de fabricação dos equipamentos dentro da indústria, e remete a concretização inicialmente bem sucedida das etapas anteriores. Sendo, então, somente para concretização dos serviços, o carregamento e a montagem da máquina no cliente em questão, o que finaliza o processo de entrega do equipamento. A Figura 2.7 mostra a foto da ponte rolante embalada e preparada para o carregamento na indústria.



Figura 2.7 – Foto de Ponte Rolante embalada para carregamento.

O *feedback* é a etapa que caracteriza o pós-venda realizado juntamente ao cliente, que serve para verificar eventuais falhas no processo de fabricação ou mesmo se todas as características técnicas foram atendidas de maneira satisfatória. Caso ocorra algum equívoco, seja técnico ou por eventual problema de falha, o setor de Assistência Técnica inicia uma nova solicitação ao setor de vendas quando necessária alguma intervenção de caráter produtivo. Quando não, apenas os técnicos são enviados para devidas correções no local de instalação do equipamento.

Esse sistema é representado de maneira contínua devido ao fato de suas características de relação com o cliente permitirem tal exposição, ou seja, cada equipamento fabricado geralmente possui características técnicas bastante específicas para o cliente, o que indica alto índice de personalização. Isso implicará que quando desejar-se alterar o equipamento ou mesmo solicitar uma peça de

reposição, todos os ciclos serão realizados novamente, ou seja, toda vez que um *feedback* de um cliente gerar uma solicitação será necessário a realização das etapas novamente, que são: a venda; o pedido; o planejamento; a pintura e o *feedback*.

Pode parecer estranho, numa primeira análise, que um simples pedido de reposição seja necessário passar pelo projeto, ou seja, a primeira pergunta a vir na mente pode ser: porque não desmembrar o setor de Projetos do setor de Pedidos, ou mesmo, porque não solicitar diretamente ao setor de Vendas para o setor de Montagem quando tal fato ocorrer?

A resposta para tal questionamento deve-se ao fato de que quando uma peça é solicitada a mesma possui características bastante personalizadas ao cliente. Sendo assim, tal produção não é de grande escala, o que implica em um estudo um mais profundo do motivo de tal solicitação.

Como o setor de Projetos é responsável pela melhoria dos produtos, eles devem então estar cientes dessas solicitações, pois as mesmas podem gerar possíveis melhorias nos equipamentos caso seja entendido que os desgastes não ocorreram em tempos adequados; também pode ocorrer que alguns componentes já não estejam mais em linha de fabricação e deverão ser substituídos o que torna-se necessário projetar novamente o componente em questão.

2.1 – O Setor de Usinagem e Suas Características

Como o foco deste trabalho é o estudo para um desenvolvimento futuro de uma ferramenta computacional para auxiliar a tomada de decisão nos processos de Usinagem. As características do setor serão apresentadas mais profundamente agora.

Como o sistema da empresa é sob encomenda ele possui equipamentos para desenvolvimento da produção com capacidades flexíveis, tornando o sistema característico de máquinas que trabalham paralelamente, de tarefas diferentes e dependentes de sequência. Produção de aeronaves, veículos espaciais, máquinas de médio e grande porte, ferramentas e equipamentos especiais são alguns exemplos desse tipo de sistema sob encomenda.

Para entendimento deste funcionamento, serão apresentadas todas as máquinas disponíveis no sistema, as quais são descritas e codificadas na Figura 2.8. As tarefas possíveis de serem realizadas nesse sistema são descritas e codificadas na Figura 2.9.

Código	Máquinas
1	Serra A
2	Serra B
3	Serra Chapão A
4	Serra Chapão B
5	Torno A
6	Torno B
7	Torno C
8	CNC A
9	CNC B
10	Centro de Usinagem
11	Mandrilhadora
12	Faceadora
13	Plainadora de Arrasto A
14	Plainadora de Arrasto B
15	Furadeira A
16	Furadeira B
17	Fresadora Universal
18	Fresadora Renani A
19	Fresadora Renani B
20	Fresadora Renani C
21	Plainadora Torpedo
22	Torno Plator
23	Retificadora
24	Pantografo
25	Guilhotina A
26	Guilhotina B

Figura 2.8 – Máquinas disponíveis no sistema produtivo.

Código	Tarefa
A	Corte de eixo
B	Corte de barra
C	Corte de chapa
D	Corte de chapão
E	Fresar plano
F	Tornear externo
G	Tornear interno
H	Tornear de rosca externa
I	Tornear de rosca interna
J	Tornear de face
K	Rosquear
L	Fresar canal
M	Facear lateral
N	Mandrilhar face
O	Mandrilhar furo
P	Fresar face
Q	Plainar superfície
R	Plainar lateral
S	Plainar interno
T	Furar
U	Fresar furo
V	Fresar dentes
W	Retificar rosca
X	Transporte

Figura 2.9 – Tarefas realizadas no sistema produtivo.

A Figura 2.10 relaciona as máquinas e tarefas disponíveis no sistema de produção. Note-se que esse sistema é composto por máquinas capazes de realizar diversas tarefas que podem ser desenvolvidas por várias máquinas, mas também algumas tarefas que só poderão ser realizadas por uma máquina.

Sendo assim, este sistema é flexível e concorrente entre as máquinas na realização de algumas tarefas, e engessado ou limitado nas outras. Além disso, são dependentes de sequência já que a maior parte das atividades desempenhadas pela empresa envolve diversas tarefas como poderá ser visualizado e entendido com mais ênfase na Tabela 2.1, tendo em vista ainda que dificilmente uma máquina será capaz de realizar todas as tarefas para confecção de um componente da produção.

Código	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	
1																								
2																								
3																								
4																								
5																								
6																								
7																								
8																								
9																								
10																								
11																								
12																								
13																								
14																								
15																								
16																								
17																								
18																								
19																								
20																								
21																								
22																								
23																								
24																								
25																								
26																								

Figura 2.10 – Relação entre as máquinas e tarefas do sistema produtivo.

A proposta deste trabalho é auxiliar na tomada de decisão, criando cenários de sequenciamento da produção que sejam relativamente melhores que as condições atuais da empresa. São considerados a melhoria de: caminho crítico; custo de produção; custo com atrasos; tempo de configurações e uma função ponderada entre os objetivos.

O sistema de produção sob encomenda é conhecido pelo atendimento às necessidades específicas dos clientes, que exigem um nível de alta personalização dos equipamentos produzidos.

Na Tabela 2.1 são mostrados dados referentes à necessidade de tempo para preparação de tarefas (*setup*). Para entendimento do problema deste sistema será apresentado nesta Figura somente os tempos de *setup* relativos a uma máquina do setor produtivo “o Torno A”, que possui código respectivo 5, na Figura 2.8. Note que os tempos apresentados na Tabela 2.1 são relacionados às tarefas que podem ser executadas nesta máquina do setor de produção (rever Figura 2.9 e 2.10).

Tabela 2.1 – Tempos de *Setup* para as tarefas do Torno A.

TEMPO DE SETUPS PARA AS TAREFAS DO TORNO A											
EE	0:02	FE	0:10	GE	0:04	HE	0:10	IE	0:08	JE	0:07
EF	0:10	FF	0:03	GF	0:15	HF	0:15	IF	0:11	JF	0:11
EG	0:04	FG	0:15	GG	0:00	HG	0:13	IG	0:22	JG	0:20
EH	0:10	FH	0:15	GH	0:13	HH	0:03	IH	0:19	JH	0:20
EI	0:08	FI	0:11	GI	0:22	HI	0:19	II	0:04	JI	0:11
EJ	0:07	FJ	0:11	GJ	0:20	HJ	0:20	IJ	0:11	JJ	0:03

A pesquisa centraliza sua resolução em duas máquinas do setor de usinagem, o Torno A e a Mandrilhadora, de respectivos códigos 5 e 11. Sendo assim, todos os dados referentes a tempos repassados são relacionados a essas máquinas. Exemplo: os tempos relacionados na Figura 2.6 como Tempo M1 e Tempo M2, referem-se respectivamente a essas máquinas, sendo M1 o Torno A e M2 a Mandrilhadora.

A escolha dessas duas máquinas para desenvolvimento de uma ferramenta que auxilie a sua sequência produtiva dá-se ao fato de possuírem suas capacidades de produção máxima, ou seja, são os gargalos da produção na empresa. Então focar na melhoria do sequenciamento nesses dois equipamentos é o objetivo principal da otimização desse setor produtivo.

Como a empresa ainda não possui uma ferramenta que determine as sequências de fabricação das ordens produtivas, são os gerentes de setores os responsáveis por determinar-las. Essa definição, muito embora seja feita com planejamento manual, é a única possível no momento, mesmo que não seja a mais apropriada.

Ainda é possível evidenciar, nesse sistema, uma falta de recursos de mão-de-obra para os gargalos (que são as máquinas estudadas) e que afetam diretamente o cumprimento dos prazos de entrega da demanda contratada.

Na Figura 2.11 são mostrados dados de possíveis sequências produtivas do componente de projeto do Truque da Ponte Rolante que vem sendo demonstrada desde a Figura 2.2, Roda (Tr10). Note-se que as Figuras mostradas até o momento só passaram informações relativas ao tempo de fabricação deste item no Torno A.

O sistema possui concorrência entre máquinas do setor produtivo (como visualizado na Figura 2.10), o qual dificulta ainda mais a decisão de escolha da melhor sequência de produção. Para entendimento, uma leitura na Figura 2.10 pode ser verificado a concorrência entre as máquinas para realização de algumas tarefas. Exemplo: máquinas de código 5 e 6, concorrem para realização das tarefas JF e também existe concorrência entre as máquinas 18, 19 e 20 para realização da “tarefa V”. Esses são alguns dos exemplos de concorrências existentes.

Equipamento:		Truque de Ponte Rolante														
Cliente:		Empresa X				Nome da peça:				Roda				Código:		Tr10
SEQUENCIA DE PRODUÇÃO	Setup 1	Tempo S1	Máquina 1	Tempo M1	Setup 2	Tempo S2	Máquina 2	Tempo M2	Setup 3	Tempo S3	Máquina 3	Tempo M3				
	1AA	0:05	1A	0:09	5EJ	0:07	5JF	1:00	18WW	0:40	18W	2:30				
	1BA	0:15			5FJ	0:11			19WW	0:26	19W	3:25				
					5GJ	0:20			20WW	0:30	20W	2:50				
					5HJ	0:20										
					5I	0:11										
					5JJ	0:03										
					6EJ	0:09	6JF	1:08								
					6FJ	0:10										
					6GJ	0:21										
					6HJ	0:12										
					6J	0:09										
					6JJ	0:04										

Figura 2.11 – Sequência de produção da Roda (Tr10) item do projeto Truque de Ponte Rolante.

Como pode ser visualizado na Figura 2.12, deseja-se sequenciar na produção o item apresentado na Figura 2.11. É possível fabricar este item com um tempo ideal de 4:29 h. Também é possível realizar uma produção um tanto equivocada pelo supervisor, chamada de tempo de produção “Nadir”. Este tempo pode chegar a 5:44 h, ou seja, um tempo aproximadamente 27% maior para realizar a fabricação deste componente.

ALGUNS TIPOS DE SEQUENCIAMENTO POSSIVEIS PARA Tr10												Total	
IDEAL	S1AA	0:05	M1A	0:09	S5JJ	0:05	M5JF	1:00	S18W	0:40	M18W	2:30	4:29
NADIR	S1BA	0:15	M1A	0:09	S6GJ	0:21	M6JF	1:08	S19W	0:26	M19W	3:25	5:44

Figura 2.12 – Tempo das sequências de produção para componente Tr10.

Porém, esta pesquisa não tem o intuito de tratar essa concorrência. Tendo em vista que a máquina Torno A é um gargalo do sistema, então somente serão sequenciados componentes para essa máquina, que são aqueles componentes que possuem as tarefas e dimensão que somente ela seja capaz de assim fazer (note-se que as demais componentes serão fabricados nas outras máquinas e não serão tratados na pesquisa). Sendo assim, as Figuras 2.11 e 2.12 só servem para mostrar outra condição, por que futuramente uma pesquisa mais ampla deverá também abordar tal questão.

Sendo parte importante na pesquisa do sequenciamento da produção, a Figura 2.13 mostra um cronograma de produção no período de uma semana, com os itens a serem produzidos que foram considerados na Figura 2.6. Este sequenciamento é realizado manualmente pelo gerente de produção do setor de Usinagem na empresa, que tenta realizar uma seqüência satisfatória para o ambiente produtivo.

Na Figura 2.13, ainda é possível observar que este sequenciamento é realizado considerando exclusivamente o prazo de entrega como critério, isto é, as ordens de produção com prazo de entrega mais curto têm prioridade. Esta pesquisa fornecerá vários cenários produtivos, para que um decisor possa escolher qual condição de produção é mais adequada no momento, tendo como base diversos objetivos a serem alcançados.

DJM		CRONOGRAMA DE PRODUÇÃO SEMANAL				código					
						FO – PRO – 006					
		folha	revisão								
		01/01	00								
Sequenciamento do Torno											
							Sequenciamento				
Quant.	Código	Prec.	Tarefas	Tempo	Prioridade	Prazo	Início	Fim	Tempo Atr.	Custo Atr.	
4	Tr10	3	FJFG	60	M Alta	300	0	240			
1	S	-	S-GJ	20			240	260			
2	Cp25	3	JGF	33	M Alta	360	260	326			
4	To43	0	FJ	60	Alta	480	326	566	86	34,4	
1	S	-	S-JF	11			566	577			
4	Cp27	3	FJFG	45	Normal	720	577	757	37	9,25	
1	S	-	S-GF	15			757	772			
2	Ts43	0	FJ	85	Baixa	1020	772	942			
3	Ts44	0	JG	95	Baixa	1020	942	1227	207	10,35	
1	S	-	S-GH	13			1227	1240			
1	Cp17	2	HJE	45	Normal	1200	1240	1285	85	21,25	
1	S	-	S-EJ	7			1285	1292			
6	Cp28	3	JFGJ	55	Normal	1320	1292	1622	302	75,5	
1	S	-	S-JF	11			1622	1633			
7	To67	3	FJFG	25	Normal	1320	1633	1808	488	122	
1	S	-	S-GJ	20			1808	1828			
3	Cp01	1	JG	22	Normal	1800	1828	1894	94	23,5	
1	S	-	S-GF	15			1894	1909			
4	Cp22	1	FJFG	38	Alta	1800	1909	2061	261	104,4	
1	S	-	S-GF	15			2061	2076			
2	Tr08	1	FJFG	45	Alta	2220	2076	2166			
1	S	-	S-GF	15			2166	2181			
5	Tr07	1	FJFG	54	Normal	2220	2181	2451	231	57,75	
1	S	-	S-GJ	20			2451	2471			
4	Cp05	3	JH	27	Alta	2400	2471	2579	179	71,6	
1	S	-	S-HJ	20			2579	2599			
3	Ts28	3	JH	120	Normal	3000	2599	2959			
1	S	-	S-HJ	20			2959	2979			
6	Ts20	1	JF	20	Normal	2700	2979	3099	399	99,75	
1	S	-	S-FG	15			3099	3114			
9	Ts71	1	GI	50	Baixa	3000	3114	3564	564	28,2	
1	S	-	S-IJ	11			3564	3575			
1	Cp11	1	J	65	Normal	3240	3575	3640	400	100	
1	S	-	S-JF	11			3640	3651			
1	Cp31	1	FH	180	Alta	3600	3651	3831	231	92,4	
1	S	-	S-HJ	20			3831	3851			
2	To13	2	JF	300	Normal	4200	3851	4451	251	62,75	
1	S	-	S-FG	15			4451	4466			
6	To08	0	GJ	75	Alta	4500	4466	4916	416	166,4	
1	Tr02	1	JG	33	Baixa	4800	4916	4949	149	7,45	
1	S	-	S-GJ	20			4949	4969			
3	Ts58	3	JF	75	Alta	5100	4969	5194	94	37,6	
2	Tr05	3	FJF	28	Baixa	5400	5194	5250			
2	Tr06	1	FJFK	37	Baixa	5400	5250	5324			

Legenda				
Níveis de prioridade	M Alta	Alta	Normal	Baixa
Multas por atraso reais/min	0,60	0,40	0,25	0,05

Caminho crítico:	5374	Tempo de Setups:	733	Obs: Valores dos objetivos incluindo sequenciamento da Mandrilhadora
Custo total:	19484	Custo atraso:	2567,75	

Figura 2.13 – Cronograma de produção semanal para o Torno.

Capítulo 3 – Planejamento e Controle da Produção

"Neste capítulo serão apresentadas informações pertinentes as características, o funcionamento e a importância desse setor dentro de um ambiente produtivo."

É fundamental a importância do Planejamento e Controle da Produção (PCP) na Gestão da Produção. Para entendimento deste trabalho deve-se considerar que o conceito de sequenciamento de produção está inteiramente ligado ao PCP nas indústrias, pois, é nesse setor das empresas, que se realiza uma tentativa de otimização tanto do desempenho da produção quanto da gestão dos recursos de bens e serviços disponíveis.

O PCP é o responsável por comandar e coordenar o sistema produtivo em uma organização. Para Slack *et al.*(1997) o PCP deve se preocupar com a conciliação entre oferta e demanda, para que isso seja possível tarefas que buscam o equilíbrio de volume e tempo no sistema produtivo devem ser desenvolvidas (SILVA, 2005). Essa preocupação com fornecimento e demanda é capaz de ajudar a gerência de produção no controle eficiente do sistema produtivo. Baseando no trabalho de Slack *et al.*(1997 *apud* Silva, 2005) as tarefas a serem desenvolvidas são:

- a) Carregamento: quantidade de trabalho a ser alocado para um centro de trabalho, que pode ser, por exemplo, operário ou máquina a desempenhar a tarefa. Deve-se então determinar o quanto de serviço será alocado para o centro de trabalho, levando em conta fatores que podem aumentar os tempos das operações, como: manutenção das máquinas, tempo ocioso (dias que operários não operam as máquinas). Sendo assim, existem duas abordagens para o carregamento de uma máquina: o finito e o infinito. Finito consiste em alocar trabalho dentro de um limite estabelecido; por exemplo: condições de operação normal. Para infinito não há limitação ao trabalho a ser alocado, mas sim uma tentativa a corresponder a todo ele (exemplo: emergências de produção).
- b) Sequenciamento: determinação da prioridade de fabricação dos produtos e serviços a serem desempenhados. Este método de escolha mais adequada da

seqüência de produtos ou serviços a serem processados no sistema produtivo é conhecido como sequenciamento de produção. Para a determinação da prioridade algumas regras de sequenciamento podem ser aplicadas, como por exemplo: data de entrega; lucro unitário; quantidade total; quantidade restante; lote típico; roteiro de produção; tempo de produção; tempo de transporte; tempo de *setup*. Para este estudo, o sequenciamento de produção terá fundamental importância para três aspectos a serem otimizados: são eles: minimizar o atraso de entrega; aumentar o custo unitário e redução do tempo de *setup*.

- c) Programação: a programação da produção pode ser visualizada em uma demonstração gráfica através de cronogramas que demonstrem o sequenciamento da mesma. Essa programação pode ser dividida em: Programação para Frente e Programação para Trás. A programação para Frente é realizada no momento que a demanda é confirmada, sendo assim muitas das vezes promove uma folga na entrega, porém requer alta utilização de mão-de-obra e possui flexibilidade para programação inesperada. Para Programação para Trás envolve-se em começar o trabalho no último momento possível, o que implica em uma não aceitação de atraso, a tarefa é desempenhada quando falta apenas a quantidade de horas para entregar, equivalente ao tempo de execução da mesma.

Quanto mais complexo for o sistema de produção, mais se torna necessário à integração entre os setores, ou seja, do PCP e a gerência de produção de uma organização. Por esse motivo que sistemas de produção sob encomenda necessitam de uma configuração adequada e bem específica para seu caso.

Para conquista de uma eficácia na produção dos produtos e serviços é indispensável que recursos produtivos estejam disponíveis na quantidade certa, no momento adequado e no nível de qualidade satisfatório (SLACK *et al.*, 1997). Segundo Slack *et al.* (1997), o PCP deve estar preocupado com o equilíbrio entre oferta e demanda. Para isso ser realizado, métodos que buscam o nivelamento de volume e tempo no sistema produtivo devem ser gerados (SILVA, 2005).

Um sistema de produção sob encomenda tem características críticas de conciliação de oferta e demanda no sistema produtivo, isso ocorre devido ao baixo volume de produtos semelhantes na produção e pela grande diversidade de

projetos, o que dificulta bastante o escalonamento das tarefas, pois são baseadas diretamente nas expectativas de encomendas. Sendo a programação da produção sob encomenda difícil, pois ela atua diretamente com diversas áreas de trabalho da empresa, é necessária uma gestão eficiente entre os setores de: projetos; administração de estoques (almoxarifado); compras e produção.

O PCP é envolvido por uma série de decisões voltadas para definição de quando e quanto é necessário produzir e comprar, além de garantir que os recursos a serem utilizados na produção estejam disponíveis (CORREIA *et al.*, 2001). Por este motivo os setores de projetos, almoxarifado, compras e produção devem estar conectados as atividades decisórias do PCP, de maneira que o escalonamento das tarefas possa ocorrer corretamente com a manutenção da oferta e demanda.

O tipo de produção estudado na pesquisa consiste em um *Job Shop* Flexível, onde uma tarefa requer uma ou várias máquinas disponíveis no sistema, seguindo uma sequência fixa e pré-determinada em projeto, sendo que em cada etapa uma ou diversas máquinas são capazes de realizar a mesma operação, o que promove uma concorrência interna e dificulta ainda mais a definição do escalonamento. Esse tipo de flexibilidade das máquinas em realizar as mesmas operações é conhecido na literatura como *routing flexibility* (PALOMINO, 2001).

Para Quezado *et al.* (1999), a resolução a nível operacional e de curto prazo do funcionamento e acompanhamento da produção, é de responsabilidade do PCP, e para Fernandes (1991) o planejamento da produção está relacionado a atividades com prazo que varia entre 3 a 18 meses. Objetivando o PCP, entende-se como controlar administração dos estoques, controlar e programar a produção, sequenciar as atividades de maneira a conciliar ordens de compra e fabricação. O propósito do PCP é garantir a produção eficaz de bens e serviços.

Esse sistema de produção de característica não repetitiva, portanto de produção sob encomenda, possui as encomendas como itens indivisíveis e a necessidade dos clientes sendo imprevisíveis. Para tanto, a principal tarefa do sistema de alocação de carga por encomenda é reemitir internamente os pedidos dos clientes na forma de ordens de fabricação, requisições de compra e requisições de ferramentas (FERNANDES e GODINHO, 2007).

A principal dificuldade nesse sistema é a manutenção de registro preciso do saldo de carga em cada centro produtivo, ou pelo menos nos centros produtivos críticos (gargalos), de forma que os prazos de entrega possam ser definidos de maneira adequada e o trabalho ter uma programação eficientemente, a fim de cumprir os prazos prometidos aos clientes (FERNANDES e GODINHO, 2007).

É essencial neste sistema a estimação dos prazos, mas para isso ocorrer de maneira satisfatória é muito comum e eficiente a preparação de um gráfico de Gantt com a alocação das cargas pelo menos no gargalo dos centros produtivos, ou seja, tratar com mais ênfase o sequenciamento neste ponto do processo (FERNANDES e GODINHO, 2007).

A Figura 3.1 retrata a identificação de um gargalo no sistema produtivo, onde fica evidenciado que um processo com capacidade ocupado no meio do sistema limita a saída do mesmo, ou seja, todo o processo é limitado pelo gargalo. Nesta Figura 3.1 pode ser notado que na fabricação de um item qualquer de um processo de produção onde exista uma demanda de 200 peças por hora, este sistema só será capaz de produzir 50 peças por hora, devido à limitação do gargalo na operação 2.

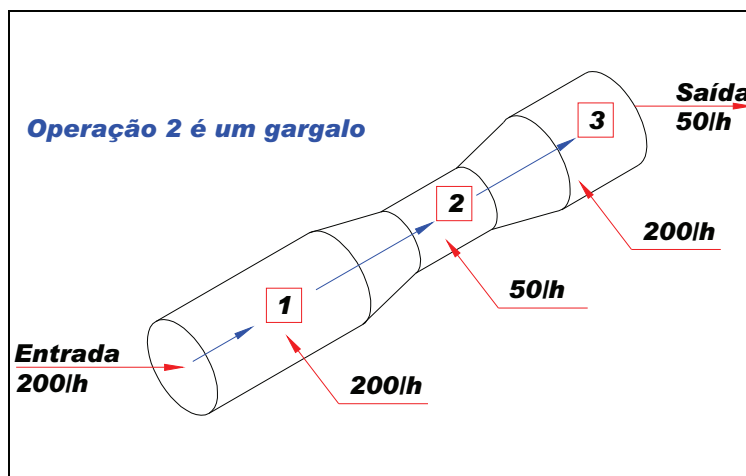


Figura 3.1 – Identificação do gargalo em um processo produtivo.

A origem dos estudos em escalonamentos de tarefas na produção se fez com Henry Gantt, que produziu a criação do Gráfico de Gantt, bastante importante naquele momento e ainda muito útil. A partir dele, diversos estudos foram direcionados para otimização dos processos de programação eficiente da produção.

Segundo Barros e Tubino (1999) as técnicas mais conhecidas e utilizadas para PCP, são:

- a) MRP (*material requirements planning*): o planejamento das necessidades de materiais; (Sistema utilizado na empresa estudada)
- b) MRPII (*manufacturing resources planning*): o planejamento dos recursos de manufatura;
- c) JIT (*just in time*): a produção no momento da necessidade;
- d) TOC (*theory of constraints*): a teoria das restrições.

A Figura 3.2 apresenta um sistema de produção puxada. Esses sistemas autorizam a produção de determinado produto em determinado tempo ao invés de programar a produção antecipadamente como acontece nos sistemas de produção empurrada (BARCO e VILELA, 2008). São sistemas que administram a produção e que procuram ajustar os produtos em relação à demanda, isto é, só se inicia o processo produtivo quando realizado o pedido (venda) pelo cliente, então a produção, o transporte e compra somente ocorre no momento exato em que se torna necessário (BARCO E VILELA, 2008).

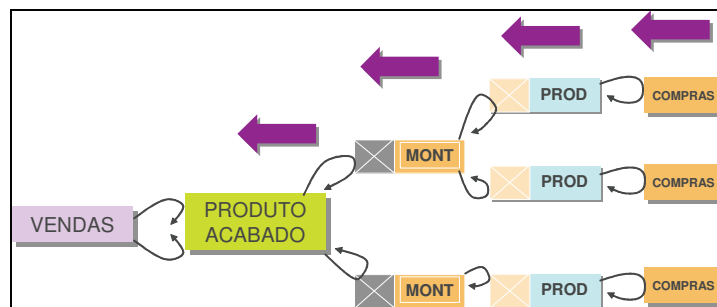


Figura 3.2 – Sistema de produção puxado.

Assim, quem começa o processo é o cliente, adquirindo um produto no setor de vendas, que passa uma solicitação para o estoque de produtos acabados, que repassa o pedido a montagem, e esta solicita a produção, que necessita de matéria prima a ser encomendada pelo setor de “compras”.

Como visto em Barco e Vilela (2008), existem também outros sistemas que englobam a filosofia JIT, como o CONWIP (*Constante work in Process*) que procura compartilhar os benefícios de reduzir estoques e ainda ser aplicável mais facilmente nos ambientes produtivos, esse fato assemelha as técnicas utilizadas nesse sistema de produção estudado.

A Figura 3.3 representa o funcionamento deste sistema, onde a sua diferença principal em relação ao Kanban é o fato da produção ser empurrada entre as estações de trabalho consecutivamente, respeitando as regras de FIFO (SPEARMAN *et al.*, 1990 *apud* BARCO e VILELA, 2008), já no Kanban a produção é puxada pelas estações posteriores, como visto na Figura 3.2. Como visto na Figura 2.1 este sistema assemelha-se mais a essas características.

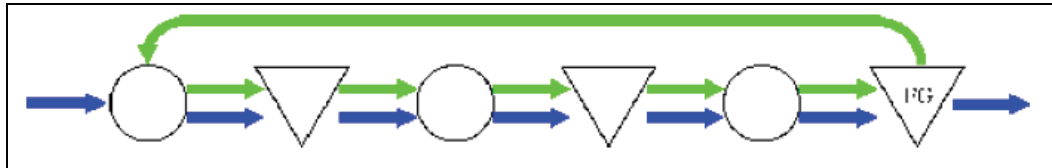


Figura 3.3 – Sistema de controle da produção CONWIP. Fluxo de materiais mostrado em azul e fluxo de informação(cartão) mostrado em verde(BONVIK, 1999 *apud* BARCO e VILELA, 2008).

É na solicitação à produção que se restringe essa pesquisa, onde é desejável criar cenários de produção satisfatórios. O estudo limita-se a tratar o problema de escalonar as tarefas a serem processadas no setor produtivo da empresa, mas precisamente no setor de usinagem nas máquinas identificadas como gargalos do sistema.

Esta identificação baseia-se na experiência da empresa com problemas de atrasos e devido à capacidade destas máquinas estarem sempre próximas da máxima, sendo muitas das vezes necessários turnos extras para cobrir atrasos.

3.1 – Escalonamento de Tarefas *Job Shop Scheduling*

O escalonamento (sequenciamento) da produção é uma atividade que determina a sequência em que as tarefas serão executadas no sistema produtivo, através da determinação das ordens e suas respectivas regras de prioridade (SILVA, 2005), onde os itens a serem processados são *jobs*, que nada mais são que as ordens de produção (OPs), compostos de partes elementares chamadas de operações ou tarefas.

Os problemas de escalonamento de tarefas são aqueles que envolvem alocação de uma serie de recursos (tempo, dinheiro, mão-de-obra, matéria-prima, máquinas, ferramentas etc), com a finalidade de executar uma determinada quantidade de tarefas. O planejamento e controle da produção encontrado nas

empresas que produzem em serie é bastante diferenciado das empresas que fabricam sob encomenda (BARROS e TUBINO, 1999).

Os problemas relacionados ao sequenciamento da produção sob encomenda são de grande complexidade e difícil resolução no universo dos problemas combinatórios (QUEZADO *et al.*, 1999) e são considerados como problemas NP-completos (GAREY e JOHNSON, 1979). Segundo Quezado *et al.* (1999) problemas de sequenciamento podem ser entendidos da seguinte forma: “deseja-se realizar n tarefas ou atividades, onde cada atividade deve ser processada pelo menos em um, quase todos ou todos os m recursos produtivos”.

Para Zhou *et al.* (2001) é extremamente dificultada a resolução ótima de um problema do tipo *Job Shop Scheduling* utilizando-se das técnicas tradicionais de otimização. Isso porque é demasiadamente complexa a resolução a nível computacional, levando em conta que em uma aplicação real soluções sub-ótimas são satisfatórias e suficientes no ambiente produtivo (ZHOU *et al.*, 2001).

Em sistemas de produção sob encomenda as tarefas devem ser realizadas em um ou diversos equipamentos, o que exige deste sistema uma grande flexibilidade de seus equipamentos de manufatura (industrialização). O objetivo principal do sequenciamento otimizado é a minimização do tempo de realização das tarefas (*makespan*), para a melhor eficiência da distribuição do sistema.

Os problemas de sequenciamento da produção são compostos por uma base de três conjuntos que formam a sua estrutura. Esses conjuntos são: $S=(S_1, S_2, S_3, \dots, S_n)$ de n tarefas, $M=(M_1, M_2, M_3, \dots, M_m)$ de m máquinas, $R=(R_1, R_2, R_3, \dots, R_r)$ de r tipos de recursos adicionais (RAVETTI, 2003). Em Ravetti (2003), é possível observar as características que definem a classificação dos problemas de escalonamento da produção. São elas:

- a) Classificação de velocidade de processamento das máquinas: máquinas idênticas; máquinas uniformes e máquinas não relacionadas. Objeto de estudo são as máquinas não relacionadas, que possuem suas tarefas executadas em tempo de processamento diretamente dependente da operação a ser executada.
- b) Características das tarefas: vetor de tempo de processamento (tempo de execução da tarefa); datas de disponibilidade (data inicial que disponível para

execução); data de entrega (data para finalizar a tarefa); prioridade (grau de importância para realização da operação). Esses são os dados característicos e gerais das tarefas a serem tratadas no trabalho. Das disposições relacionadas à data de entrega, poderá haver penalizações referentes ao atraso.

- c) Características dos recursos adicionais: pode-se destacar a sua necessidade básica para execução da operação, ou falta de utilidade, podendo também ser caracterizados no problema como variáveis binárias que indicam o valor '0' como não utilizado e '1' como obrigação para utilização.

A eficiência produtiva está relacionada a um bom escalonamento das tarefas. Esse pode gerar ganhos através dos bons resultados, com vantagens na redução de tempo no sistema de produção e também dos estoques, ações que podem gerar aproximação de um sistema de produção *Just In Time* ou de uma adoção de TOC.

Sem dúvida, a TOC é mais realista no ponto de vista de aplicação prática no Brasil, pois essa técnica exige uma ligeira aceitação dos estoques, porém deve ser utilizado de maneira a manter somente os gargalos previamente identificados e em funcionamento máximo, para reduzir atrasos e diminuir *lead-time* do sistema (CSILLAG e CORBETT, 1998). As condições geográficas do Brasil dificultam a aplicação total do *Just In Time*, pois o distanciamento das empresas pode ocasionar falhas em sistemas que não possuem estoque de segurança.

Algumas considerações de Pinedo (1995) devem ser seguidas para entendimento desse problema de JSS (*Job Shop Scheduling*), são elas:

- a) Todas as máquinas são diferentes e suas velocidades de processamento são constantes.
- b) Operações não podem ser interrompidas;
- c) Cada máquina pode processar apenas uma operação em cada instante de tempo;
- d) Cada *job* só pode estar sendo processado em uma única máquina;
- e) Cada *job* é produzido por uma sequência conhecida de operações.

Ainda devem ser consideradas algumas restrições diferentes do trabalho de Pinedo (1995) são elas:

- a) Um *job* somente deve ser escalonado nas máquinas onde são necessárias operações;
- b) Podem existir restrições de precedência entre operações dos *jobs*;
- c) Cada *job* tem rota própria a percorrer através de m máquinas do sistema e pode se visitar qualquer máquina apenas uma vez, não se permitindo recirculação (MARTINS, 2000);
- d) Não há precedência das operações de diferentes *jobs* e uma tarefa não pode ser interrompida e retomada tempos depois (MARTINS, 2000);
- e) Pode haver necessidade de reprogramação do *jobs*;
- f) O momento inicial de processamento de tarefas nas máquinas poderá ser diferente.

Na pesquisa de Barros e Tubino (1999), é apresentada uma metodologia para implementação do PCP em empresas de pequeno e médio portes. Nesse trabalho é dada a importância para a implementação ideal do PCP, sequenciando de maneira ideal os passos de definição da equipe, tais como sensibilização, nivelamento do conhecimento, caracterização do tipo de sistema produtivo, levantamento de informações e análise do sistema atual.

Os resultados da pesquisa de Barros e Tubino (1999) mostram que o conhecimento da situação atual da empresa é necessário para promover a melhoria e possibilitar a adoção de sistemas computacionais. Entende-se que para que seja possível promover soluções realmente satisfatórias no sistema de produção real, além da equipe de planejamento e controle os demais envolvidos na produção, também deve-se conhecer os benefícios e a maneira como funciona a determinação das seqüências ideais.

Este conhecimento do sistema de produção demonstra que a identificação dos gargalos do sistema são os primeiros passos a serem tomados para qualquer melhoria que se desejar realizar em termos de otimização, pois de nada adiantará melhorar a eficiência de processos que não melhorem o sistema como um todo.

Por este motivo, o gargalo é o ponto ideal a ser estudado e melhorado, por isso considera-se que um sistema para ser perfeito, todos os processos devem ser considerados gargalos, uma vez que todos eles irão possuir capacidade de

produção nivelada, sendo igualmente produzidas todas as quantidades em todos os pontos do processo, o que se tornaria produção contínua.

A Figura 3.4 demonstra esse equilíbrio em todos os níveis de um determinado sistema produtivo ideal, ou seja, tenta representar um sistema de produção onde todas as operações são gargalos, isto é, não existem gargalos de capacidade produtiva no sistema.

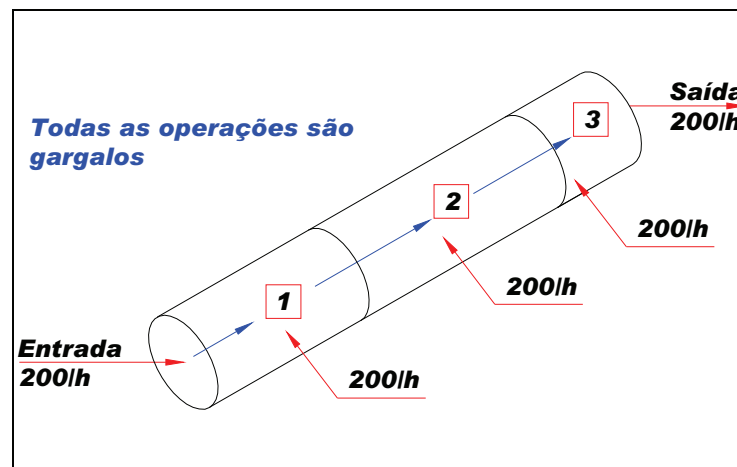


Figura 3.4 – Sistema com todas as operações sendo gargalos.

3.2 – Regras de Prioridade

A determinação das sequências das tarefas no sistema de produtivo são estabelecidas por regras de prioridade. Essas regras servem para compor e classificar os produtos a serem fabricados. Em Silva (2005) são listadas algumas regras encontradas na literatura, elas são listadas a seguir.

- a) Data de entrega: corresponde ao prazo de entrega do produto, acertado com o cliente;
- b) Lucro unitário: preço de venda de uma unidade do produto;
- c) Quantidade total: quantidade total a ser produzida de um produto;
- d) Quantidade restante: quantidade do produto que ainda deve ser produzida no momento em que um evento ocorre no processo de produção;
- e) Lote típico: tamanho usual dos lotes do produto;
- f) Roteiro de produção: corresponde aos caminhos possíveis que o produto pode percorrer para ser produzido;

- g) Tempo de produção: tempo total que uma unidade do produto leva para ser produzida;
- h) Tempo de transporte: tempo de transporte do produto entre dois pontos (duas máquinas, por exemplo) do ambiente de produção;
- i) Tempo de *setup*: tempo de configuração para cada uma das máquinas que compõem o roteiro de produção do produto.

Um exemplo da aplicação das regras de prioridade pode ser visualizado abaixo. Na Tabela 3.1 são mostrados os dados que compõem uma lista de produtos a serem produzidos em um sistema de produção qualquer. Esses produtos possuem prazos de entrega e lucro unitário diferenciados.

Tabela 3.1 – Produtos a serem fabricados.

Produto	Prazo (dias)	Lucro (reais)
Carro	30	54.000
Ponte	90	73.000
Redutor	15	4.000
Talha	35	31.000
Tear	180	140.000

Baseando-se no lucro, a Figura 3.4 demonstra o resultado do sequenciamento da produção para esses produtos. Já a Figura 3.6 apresenta outro resultado baseando-se no sequenciamento utilizando a regra de prioridade do prazo de entrega.



Figura 3.5 – Sequenciamento baseado no lucro unitário.



Figura 3.6 – Sequenciamento baseado no prazo de entrega.

O entendimento dessas regras é importante, pois eles servem como base para os objetivos do sistema de produção; então, é a partir dessas regras que serão criadas as metas de otimização do processo produtivo, sendo que é impossível

encontrar na maior parte dos casos uma solução ideal para todas as regras aplicadas no processo, tornando necessário o uso de outra concepção para determinar uma solução que seja satisfatória em vários aspectos (objetivos).

3.3 – Medidas de Desempenho

As medidas de desempenho ou mesmo, metas do sistema de produção, servem para estabelecer os objetivos juntamente com as regras de prioridade. Muitas das vezes esses critérios de desempenho também são contrastantes, o que implica em determinar corretamente as condições a serem atendidas em cada uma delas. Algumas medidas de desempenho apresentadas em Silva (2005) são expostas a seguir:

- a) *Makespan*: é o tempo necessário para produzir um grupo de produtos. Ou seja, é o tempo decorrido desde o início da primeira operação envolvendo o primeiro produto a ser processado até a última operação envolvendo o último produto;
- b) Tempo de fluxo: é o tempo total gasto desde o momento em que um produto começa a ser processado até o término da última operação que envolve sua produção;
- c) Tempo de atraso (*tardiness*): é o tempo de atraso entre o término da fabricação de um grupo de produtos e a data de entrega;
- d) Tempo de antecipação (*earliness*): é o tempo de antecipação do término da fabricação de um grupo de produtos em relação à data de entrega.
- e) Pontualidade (*lateness*): é a diferença de tempo entre o momento de término de um grupo de produtos e o prazo de entrega. Expressa o quanto o grupo de fabricação desviou-se do prazo pretendido;
- f) *Lead-time*: é o tempo gasto desde o momento em que foi feito o pedido até a entrega do produto;
- g) Utilização: porcentagem de tempo de uso de cada recurso (máquina) em relação ao tempo que ficaram disponíveis;
- h) Trabalhos em processo: quantidade de produtos que estão sendo processados simultaneamente.

Escolher as medidas de desempenho e as regras de prioridade, são as principais considerações a serem tomadas nos problemas de sequenciamento, pois a partir delas serão formados os objetivos e as metas do sistema de produção que

se deseja otimizar. Nota-se que para se utilizar vários objetivos, promovem conflitos entre os mesmos e não será possível encontrar soluções que sejam ótimas para todos eles.

Ainda que seja normal e relevante não fazer cálculos das necessidades para todos os recursos disponíveis, nem todos os centros produtivos envolvidos. ou mesmo os diversos departamentos existentes nas empresas, focalizando então a devida atenção apenas naqueles recursos considerados escassos ou críticos (OLIVARES, 2003 *apud* TUBINO, 1997). Sendo assim, é de fundamental importância caracterizar uma identificação adequada dos gargalos do sistema, isto é, identificar eficazmente os recursos escassos como objetivos a serem conquistados.

3.4 – Importância do PCP

Saber planejar e controlar eficazmente a produção são tarefas árduas, difíceis de ser conquistadas, porém com o passar dos anos estudos são realizados para desenvolver técnicas e conceitos que tentam amenizar tais dificuldades. Entretanto os ambientes produtivos estão em constante evolução, devido às mudanças nas formas de adaptação ao mercado, e com o passar dos anos fica evidente a necessidade de se atender as condições específicas dos clientes.

Esta pesquisa em um sistema de produção sob encomenda, tenta relatar mais um caso da evolução que os modelos de produção vêm sofrendo nos últimos anos e como eles devem criar mecanismos para adaptar-se a essas condições, pois são cada vez mais direcionados para uma produção personalizada, isto é, procuram atender os clientes de maneira mais customizada quanto possível.

Então o PCP como instrumento de organização e controle dos ambientes de produção, possui papel fundamental para que a evolução ocorra de maneira adequada. Na Figura 3.7 é demonstrada a evolução que está ocorrendo nos ambientes produtivos da maioria das empresas.

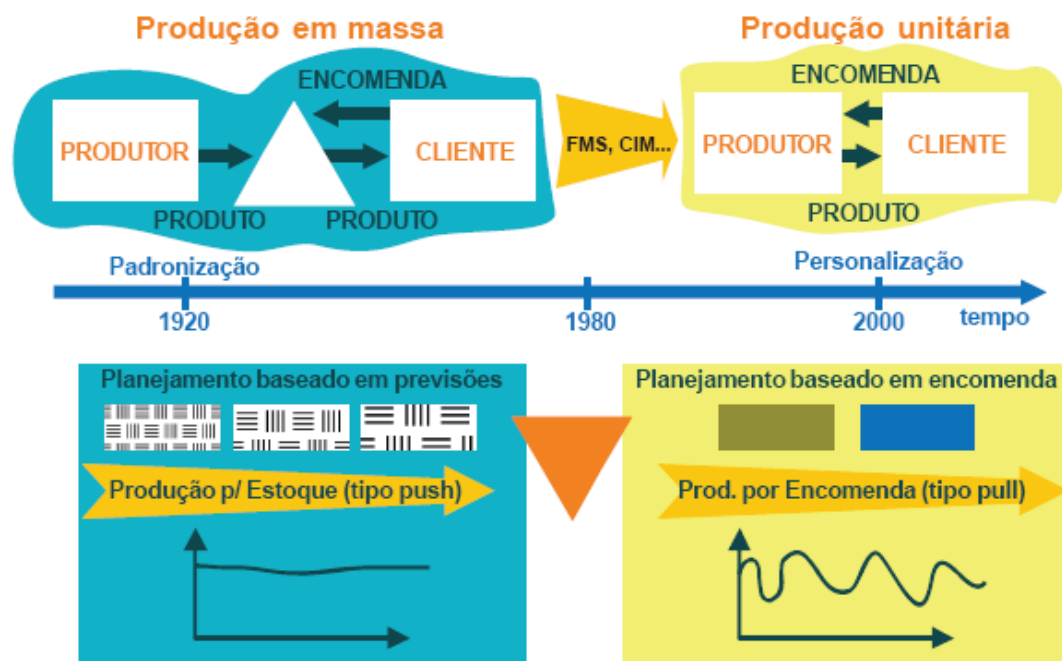


Figura 3.7 – Evolução dos modelos de produção (PEROBA, 2007).

Essa evolução aponta claramente para uma produção oscilante e personalizada, onde o relacionar-se com o cliente passa a ser responsabilidade do fabricante. A evolução retrata os novos ambientes de produção das empresas onde a padronização dá lugar à alta customização dos produtos e serviços desenvolvidos. É importante que as indústrias se adaptem o quanto antes a essa evolução para que possam atender as demandas de maneira satisfatória. Porém, essas condições são complicadores em qualquer sistema de produção e exigem pesquisas e aprofundamento das técnicas atuais.

Este trabalho pretendeu desenvolver um algoritmo que auxilie as tomadas de decisão relativas ao sequenciamento da produção sob encomenda, sendo retratado como em qualquer sistema real de produção, ou seja, ambiente produtivo com vários objetivos a serem otimizados. A ferramenta, porém, se restringe a tratar somente duas máquinas consideradas os gargalos da produção atual. A frente deste documento são abordados os aspectos a serem otimizados bem como as técnicas empregadas para se resolver satisfatoriamente o problema.

Capítulo 4 – Algoritmos Genéticos

“Neste capítulo será apresentada uma visão geral sobre algoritmos genéticos dando um enfoque para o problema estudado.”

O Algoritmo Genético (AG) é um método heurístico de busca estocástica baseado no processo de evolução biológica que favorece o alcance do ótimo global ou aproximação satisfatória. Estes algoritmos se baseiam na teoria da evolução por seleção natural. Essa teoria é o uso de técnicas para busca de soluções, que tem por inspiração a seleção e genética natural (GOLDBERG, 1989).

Esses algoritmos têm sido utilizados com eficiência para busca de soluções em grande variedade de problemas complexos. Tais como: otimização de funções numéricas em geral, otimização combinatória, aprendizado de máquina, processamento de imagem, robótica (CORTES, 2003). Ainda fornecem soluções de qualidade boa, em termos de tempos computacionais aceitáveis a partir de uma fácil implementação (CORTES, 2003 *apud* GOLDBERG, 1989).

4.1 – Conceitos Básicos

Os Algoritmos Genéticos (AGs) foram publicados inicialmente em 1975 pelo professor Jonh Holland, da Universidade de Michigam e popularizado por Goldberg (1989). Estes algoritmos se baseiam na teoria da Seleção Natural de Charles Darwin, que no ano corrente completa seu bi-centenário de nascimento. No livro “Sobre a origem das espécies por meio da seleção natural” ou “A Preservação das Raças Favorecidas na Luta pela Vida”, Darwin pressupõe a evolução das espécies pela capacidade dos indivíduos se adaptarem ao seu habitat, onde apenas os mais aptos sobrevivem.

4.1.1 – Representação do Cromossomo

A representação do indivíduo por meio de cromossomo, normalmente, é feita por um vetor, isto é, uma cadeia de caracteres que representam alguma informação relativa às variáveis do problema. Esses elementos do vetor cromossômico são denominados de gene, que de certo modo denota uma característica do indivíduo.

Normalmente os cromossomos (indivíduos) são gerados aleatoriamente. Que após sua criação tem suas características avaliadas, seja pela capacidade de prover uma solução ao problema, seja pela capacidade de geração de descendentes mais aptos.

Na Figura 4.1 é possível visualizar duas representações de cromossomos, sendo a primeira, para um cromossomo básico binário com representação amplamente conhecida na literatura. A segunda parte da Figura mostra a representação de um cromossomo formado de genes compostos por cadeias de caracteres, que representam uma formulação cromossômica um pouco menos difundida, porém presente de maneira similar nesta pesquisa.

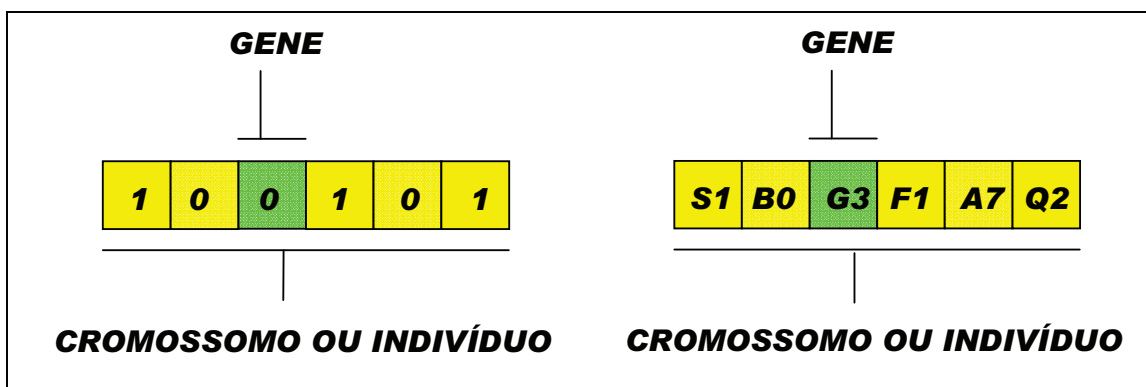


Figura 4.1 – Representações básicas de cromossomos.

4.1.2 – Operadores Genéticos

4.1.2.1 – Seleção

A seleção é o processo de escolha dos indivíduos mais aptos da população, sendo esta avaliação medida pela função de aptidão, aplicada em todos os membros da população. A definição dos indivíduos selecionados deve-se a necessidade de utilizar os mesmos como progenitores na reprodução. Sendo assim, o operador de seleção torna-se responsável por selecionar os melhores indivíduos da população corrente.

Assim, os indivíduos com aptidão maior, possuem maiores chances de se reproduzirem, descartando naturalmente os menos aptos. A seleção então prioriza o processo de reprodução para geração futuras de indivíduos com as características medidas como mais aptas a resolução do problema. Em Goldberg (1989) verifica-se

que depois de muitas gerações a melhor solução tende a ser a ótima ou próxima dela.

Os métodos de seleção mais comuns conhecidos na literatura são: o método da roleta e o método de torneio.

- **Roleta:** No método de seleção da roleta (*Roulette Well*), os indivíduos da população recebem uma porção da roleta proporcional à sua medida de aptidão, assim sendo, os indivíduos com aptidão maior terão uma proporção maior da roleta, enquanto os indivíduos menos aptos possuem proporção menor. Após esta definição será rodada a roleta para seleção dos indivíduos capazes de criar descendentes mais aptos; logo, os cromossomos com maior proporção da roleta terão maior chance de estarem nas próximas gerações.
- **Torneio:** No método de seleção por torneio (*Tournament*), os indivíduos são escolhidos aleatoriamente e depois confrontados. Sendo que aqueles indivíduos que possuem maior aptidão serão selecionados a cada iteração e aqueles cromossomos menos aptos deverão estar sendo eliminados a cada nova geração.

4.1.2.2 – Cruzamento (*Crossover*)

Cruzamento é o operador que diferencia os AGs em relação a outras técnicas. A troca de genes é realizada entre cromossomos da geração atual, que por sua vez gera cromossomos descendentes (filhos) semelhantes aos cromossomos pais. Aplicação do cruzamento ocorre após a seleção dos indivíduos em uma população corrente através de um operador de seleção.

A propagação de características dos mais aptos, entre os indivíduos gerados a cada nova geração é à base desses cruzamentos. A ideia central é gerar filhos mais aptos a cada geração, formando gerações que possuem melhor capacidade de resolução dos problemas.

A aplicação do operador de cruzamento ocorre se uma determinada probabilidade de ocorrência for atendida. Sendo assim, é fixada uma taxa de probabilidade de cruzamento, sendo que a cada iteração é gerada aleatoriamente

um valor que represente a taxa de mutação, caso seja menor ou igual à taxa, ocorrerá o cruzamento, e no caso de não ocorrer cruzamento, os cromossomos filhos serão cópias dos pais selecionados. Os tipos de cruzamentos mais aplicados são: simples ou de um ponto, multipontos e uniforme.

- **Simples ou de um ponto:** um ponto de cruzamento é escolhido aleatoriamente ou pré-determinado, e a partir deste ponto as informações genéticas dos cromossomos pais são trocadas para geração dos novos descendentes. A Figura 4.2 apresenta um exemplo deste tipo de cruzamento;
- **Multipontos:** é generalização da troca de material genético dos pais, onde muitos pontos de cruzamento são selecionados para que haja troca de segmentos de informações genéticas. A Figura 4.3 apresenta um exemplo deste tipo de cruzamento;
- **Uniforme:** não utiliza pontos de cruzamento fixos, mas ocorre através da probabilidade de cada gene ser trocado entre os pais. Será gerado uma máscara de cruzamento, aleatoriamente, a qual quando houver um valor correspondente a 1, será copiado o gene do primeiro pai, caso contrário (0) será copiado do segundo pai. A Figura 4.4 apresenta um exemplo deste tipo de cruzamento.

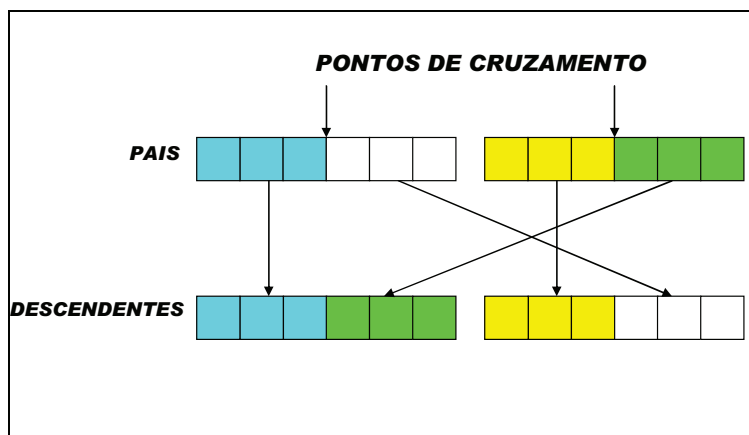


Figura 4.2 – Representação de cruzamento de cromossomos em um ponto.

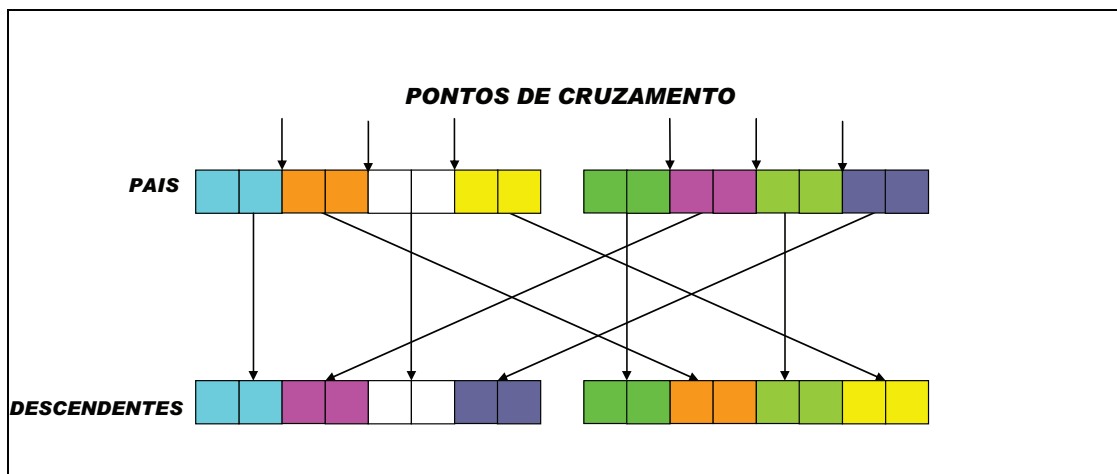


Figura 4.3 – Representação de cruzamento de cromossomos multipontos.

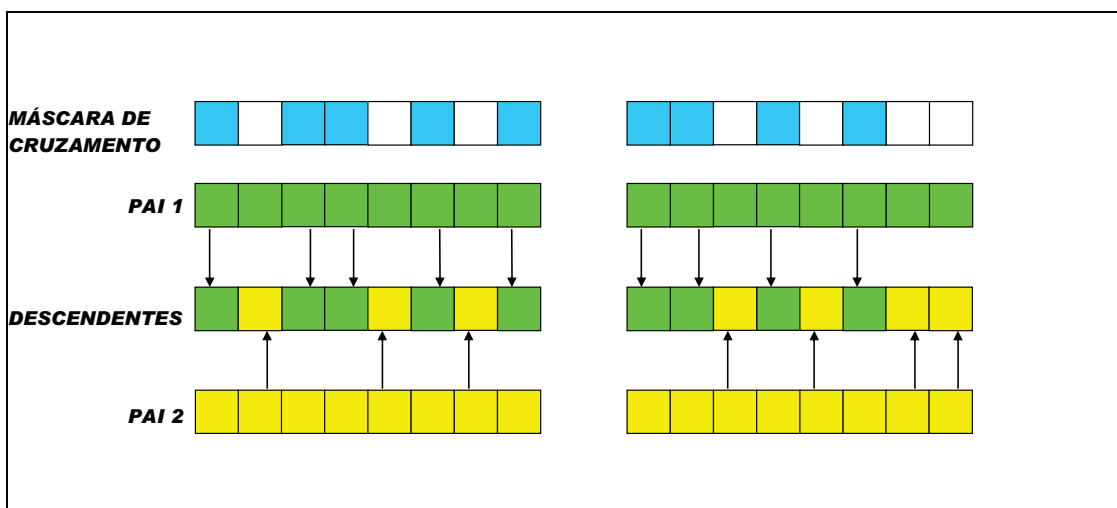


Figura 4.4 – Representação de cruzamento de cromossomos uniforme.

4.1.2.3 – Mutação

A mutação é o operador capaz de gerar uma modificação arbitrária de um ou mais genes dos indivíduos escolhidos, sendo responsável pela diversidade genética nos indivíduos da população. Ela é realizada trocando-se um dos genes do cromossomo por outro escolhido aleatoriamente dentre os valores possíveis.

A introdução ou manutenção dessa diversidade genética da população pode ocorrer de duas maneiras, uma pela troca de posições dos genes e outra pela substituição dos valores de alguns genes, ou seja, em um cromossomo binário se o valor for igual a 0 logo passa a ser 1 no gene alterado e vice e versa. A Figura 4.5 apresenta a mutação por substituição dos valores e a Figura 4.6 apresenta a mutação por troca de posições.

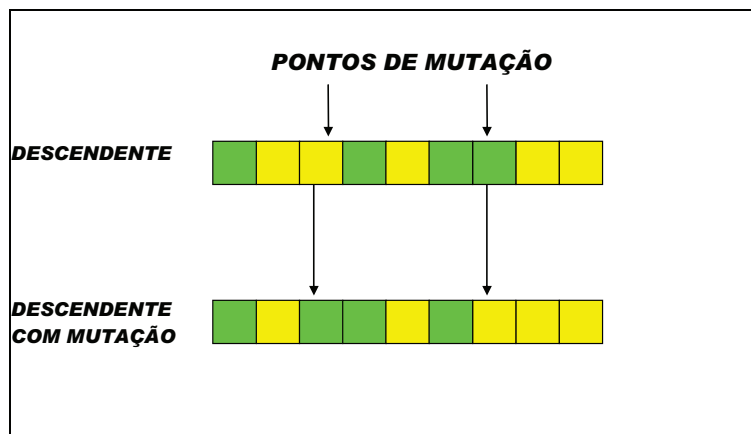


Figura 4.5 – Mutação de cromossomo por substituição de valores.

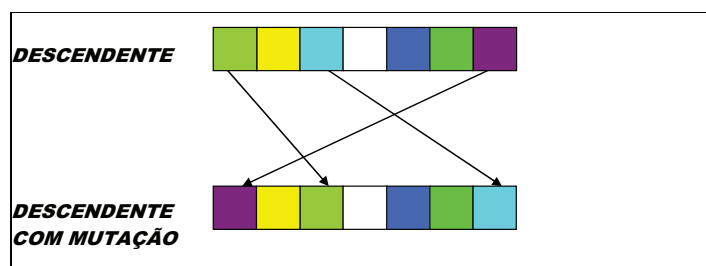


Figura 4.6 – Mutação de cromossomo por troca de posições.

A mutação por troca de posições geralmente é utilizada quando a representação cromossômica indique que os genes simplesmente não possam ser repetidos. Ou seja, não poderá ocorrer uma mutação onde o novo indivíduo gerado crie um cromossomo com genes iguais.

Assim, a aplicação deste tipo de técnica é mais comum quando os genes representam um conjunto de informações para o cromossomo, e não somente uma representação binária ou inteira. Caso este de representação mais complexa utilizado nesta pesquisa.

Normalmente a mutação por troca ocorre da seguinte forma: são escolhidos aleatoriamente dois ou mais genes e os mesmos têm suas posições trocados entre si. Quando a utilização é restrita a dois genes apenas, os mesmos são trocados diretamente, isto é, uma posição pela outra. No caso do algoritmo solicitar três ou mais genes a serem escolhidos e trocados de posição, a troca ocorre de maneira aleatória, podendo até mesmo não haver uma troca, ou seja, caso o gene seja selecionado para mesma posição novamente.

4.1.2.4 – Elitismo

Outro operador genético conhecido é chamado de Elitismo. Trata-se de uma variação do operador de seleção, e pode ser considerado como uma versão artificial da seleção natural, pois é permitida a preservação das melhores soluções que o algoritmo encontrou ao longo de todas as gerações. Então a idéia básica do elitismo trata de armazenar as melhores soluções ao longo de todo o processo de utilização do AGs aplicado ao problema.

Esse método copia as melhores soluções e preserva para futuras comparações, onde só serão descartadas caso uma nova solução considerada mais adequada seja encontrada, isto é, uma nova solução elitista do problema. O elitismo pode melhorar o desempenho dos AGs, pois previne essa perda de informação referente a melhor solução encontrada.

A elite genética, assim conhecidas as melhores soluções encontradas, pode ser guardada em uma mesma quantidade ao longo das gerações. Esse armazenamento que tem separado a população das soluções elite é necessário para que elas não sejam destruídas pelos operadores de Cruzamento e Mutação, ou então se percam se não forem selecionados para reprodução.

Quando é criada uma nova população por cruzamento e mutação, existe uma chance grande de se perder os melhores cromossomos encontrados até o momento, devido ao fato da seleção ocorrer aleatoriamente entre os indivíduos da população.

Por isso, o artifício é bastante benéfico, pois mesmo considerando que o algoritmo genético possui característica evolutiva no sentido de melhoria a cada iteração, uma solução satisfatória poderá ser descartada em uma geração e não reaparecer nas futuras gerações, ou seja, poderá ocorrer que na ultima geração essa solução boa não esteja presente.

4.1.3 – Medidas de Desempenho

Na pesquisa são separadas e diferenciadas as funções de avaliação e aptidão, caracterizando suas ações de maneira distintas ao seu funcionamento dentro do algoritmo. Diferente do que ocorre normalmente em AGs.

Fica definido que a função de avaliação serve somente para medir o desempenho de um cromossomo como solução do problema, isto é, mede a capacidade dessa solução para resolver o problema.

Já a função de aptidão tem como objeto fundamental o do processo de seleção, que, por sua vez, tende a evoluir com soluções capazes de gerar descendentes viáveis, mesmo que no momento de sua solução esse cromossomo represente uma solução inviável ao problema proposto.

4.1.3.1 – Avaliação

A função avaliação serve para medir o desempenho do cromossomo como solução para o problema proposto, considerando por sua vez cada objetivo em separado e também uma combinação por proporcionalidades definidas pelo agente decisor de todos ou alguns dos objetivos simultaneamente.

Cada indivíduo da população pode representar uma possível solução ao problema dado, onde a avaliação do AG promove as boas ou melhores soluções do problema analisado e exclui as más ou inviáveis soluções encontradas.

4.1.3.2 – Aptidão

A função aptidão caracteriza-se pela medição de desempenho de um cromossomo em ser capaz de gerar descendentes viáveis ao problema proposto. Neste ponto os critérios adotados no processo seletivo são de fundamental importância, pois a seleção dos indivíduos para cruzamento ocorre pela medição dos mesmos nesta função de aptidão. Um estudo mais aprofundado das condições de inviabilidade das soluções torna-se necessário para que essa função evite a ocorrência das mesmas.

Assim os AGs modificam a população a cada geração de novos indivíduos (descendentes), pela capacidade de adaptabilidade medida pela função de aptidão do mesmo. Isto é, novas gerações de indivíduos são geradas utilizando-se dos princípios básicos de Darwin de reprodução e sobrevivência dos mais aptos. Por sua vez, essas novas gerações são criadas de operações genéticas de cruzamento e mutação aplicadas aos indivíduos mais aptos selecionados.

4.1.3.3 Problemas com Restrições

AGs tradicionais utilizados para resolver problemas com restrições, podem ser insatisfatórios, pois não é possível ter certeza da viabilidade das soluções após ocorrer os processos de cruzamento e mutação (CORTES, 2003 *apud* LENIVE, 1997). A questão principal então passa a ser o tratamento de soluções inviáveis, para que seja possível um desempenho considerado eficiente do algoritmo.

Esses problemas que tratam das restrições podem ser considerados como recente área de estudo, o que proporciona uma ampla abordagem para pesquisas a serem desenvolvidas, neste documento é tratado um problema de sequenciamento da produção pertencente à classe de problemas com restrições (CORTES, 2003).

As técnicas empregadas para penalização, normalmente se caracterizam por penalizar a função objetivo no caso de ocorrer uma solução inviável ao problema. No entanto, a utilização desta técnica associada à função de avaliação como objeto de do processo de seleção geralmente falha, isto é, se promover uma pena muito suave para a solução, muitas soluções inviáveis serão permitidas na propagação. Ao contrario, se ocorrer uma penalização muito dura, os cromossomos que representam essas soluções não participarão mais do processo evolutivo, provocando uma busca direcionada ao interior do espaço de soluções.

Ocorre então que essa técnica deve ser empregada de modo a se escolher “penas” apropriadas a cada tipo de problema (CORTES, 2003). Pensando assim, a pesquisa retrata essa abordagem de maneira diferenciada, ou seja, a penalização é severa, porém, só ocorre na avaliação dos cromossomos como solução do problema, não influenciando na função de aptidão que será utilizada para gerar a seleção dos cruzamentos para geração de novos indivíduos.

Muito embora esta abordagem pareça distante de uma representação genética natural, não o é, existem muitos casos na evolução do homem que servem para representar que dois indivíduos aparentemente incapacitados para alguma condição de adaptação possam gerar um descendente muito mais apto, através do seu cruzamento genético. Exemplo: O ser humano mais alto do mundo é descendente de dois indivíduos naturalmente mais baixos, entretanto os pais podem

ser formados por indivíduos de altura mediana ou mesmos baixos, veja o anexo 1 desta pesquisa, que apresenta uma curiosidade sobre o tema.

Sendo assim o tratamento de seleção das soluções pode ocorrer não somente considerando a sua avaliação como solução para o problema, mas sim analisando sua aptidão em formar uma solução válida, assim, uma solução inválida poderá ser capaz de produzir uma solução viável após um cruzamento, desde que a avaliação ocorra pela aptidão das soluções em gerar descendentes viáveis.

4.1.4 – Funcionamento do Algoritmo Genético

Existem diversos tipos e variações de AGs, entretanto, a estrutura geral é comum, podendo ser descrita da seguinte forma (CORTES, 2003 *apud* JARAMILLO *et al.*, 2002):

Etapa 0: Geração da população inicial de cromossomos;

Etapa 1: Avaliação da aptidão de cada cromossomo da população;

Etapa 2: Seleção dos cromossomos que produzirão descendentes;

Etapa 3: Geração de descendentes através de cruzamento e mutação;

Etapa 4: Repetir as etapas 1, 2 e 3 até que alguma condição de parada seja satisfeita.

A Figura 4.7 descreve o esquema de funcionamento de um algoritmo genético básico, através de um pseudocódigo.

```

Algoritmo Genético;
Início
  g := 0;
  Inicialize (P,g);
  Avalie (P,g);
  Enquanto (não condição de parada) faça
    g := g + 1;
    Selecione (P,g) a partir de (P,g-1);
    Cruzamento(P,g);
    Mutação(P,g);
    Avalie (P,g);
  Fim {enquanto}
Fim {AG}

```

Figura 4.7 – Algoritmo genético básico.

4.2 – Definições

Para Castro (2001), a eficiência e o funcionamento do AG são dependentes diretos dos seus parâmetros de controle, isto é, dos parâmetros definidos pelo agente decisor. Cabe então a realização de uma calibração por simulação do algoritmo testando esses aspectos, onde o equilíbrio entre intensificação da busca e diversificação das soluções possa gerar soluções satisfatórias e provavelmente evolucionárias a cada geração.

Segundo Ticona (2003) alguns passos devem ser definidos para implementação de um algoritmo genético. Baseados nas idéias centrais de Ticona (2003), Castro (2001) e na representação das condições desta pesquisa, são eles:

- a) Definir uma representação do cromossomo a ser utilizado para cada indivíduo de maneira que uma solução completa possa ser representada por ele;
- b) Definir as estratégias de evolução dos indivíduos, bem como: seleção, cruzamento e mutação;
- c) Definir a função de aptidão e também de avaliação;
- d) Ajustar de maneira manual, isto é, pelo agente decisor baseado na expectativa do problema tratado, os seguintes parâmetros: tamanho da população, probabilidade de cruzamento e da mutação e número de gerações.

Como visto em Mazzucco (1999), a eficácia de um AG depende muito de uma representação adequada do cromossomo para solução de um problema. Carregando todas as informações necessárias dentro dessa representação.

O tipo de implementação do algoritmo deve ser eficaz ao ponto de vista de respeitar as restrições do problema, onde as estratégias empregadas de seleção, cruzamento e mutação não destruam as soluções, mas sim promovam uma evolução nas gerações futuras.

A função de aptidão deve ser baseada em um estudo direcionado do problema, onde as características do sistema devem ser fundamentais para entendimento de como uma solução pode ser mais apta a gerar novos indivíduos. Na função de avaliação, a medição de uma solução como satisfatória aos objetivos do problema deve ser bem representada e assim ponderada.

Os ajustes dos parâmetros podem ser conseguidos através da ajuda da simulação ou experimentação computacional com *software* desenvolvido, sendo que o parâmetro que retrata o tamanho da população representa a quantidade de indivíduos (cromossomos) presente a cada geração. Esta definição é muito importante, pois afeta diretamente no desempenho global e na eficiência do AG.

Aparentemente uma grande população parece ser o caminho a ser seguido, pois apresentará uma grande cobertura do espaço de soluções, no entanto os custos computacionais se elevam com essa condição. Já uma manipulação através de uma pequena população favorece a complexidade computacional, mas pode ser falho na cobertura do espaço de soluções.

A taxa de cruzamento é um parâmetro no qual se define a probabilidade de haver cruzamento na geração de descendentes. Quanto maior for esta taxa, mais rapidamente indivíduos novos aparecerão na população, substituindo assim boa parte, ou a totalidade da população. Essa característica pode ressaltar indivíduos de avaliação excelente. Entretanto, uma baixa taxa pode resultar em uma convergência muito lenta.

O parâmetro de taxa de mutação indica a probabilidade de ocorrência de mutações nas estruturas dos cromossomos gerados. Um valor baixo servirá como mecanismo para evitar que as soluções continuem aparecendo ao longo das gerações. Por outro lado, um valor alto na taxa poderá fazer com que o algoritmo se comporte de maneira bastante aleatória.

O parâmetro de número de gerações serve para definir o tamanho do espaço de busca a ser coberto. Este valor possui influência na quantidade de indivíduos a serem substituídos até o final das iterações do algoritmo, sendo que uma grande quantidade de gerações poderá substituir a maior parte da população, favorecendo a busca.

Como a pesquisa retrata o elitismo, não se torna problema uma perda dos indivíduos mais aptos, pois esses são armazenados e comparados com os novos descendentes gerados a cada iteração. O que implica em uma experimentação baseada neste parâmetro relacionada diretamente com os custos computacionais empregados.

4.3 – Estado da Arte

A pretensão de aplicação tende a ser satisfatória com o uso de AGs devido a experiências em estudos recentes, envolvendo sequenciamento da produção com este tipo de heurística. Como diferencial desta pesquisa, temos uma aplicação real sendo estudada em um sistema produtivo de produção sob encomenda. Diversos estudos demonstram o bom comportamento na utilização de AGs no escalonamento de tarefas.

Neste estudo também se pretende utilizar como heurística de resolução, uma ferramenta desenvolvida com base no algoritmo genético, sendo que a característica deste trabalho é aplicação prática em um sistema de produção sob encomenda.

Pouco tempo atrás, aplicação de uma heurística poderia ser considerada uma admissão de derrota (MARTINS, 2000). Porém, já é sabido que muitos problemas de caráter combinatório de escalonamento são intratáveis de maneira ótima (GAREY e JOHNSON, 1979). O atual estado da arte indica que heurísticas buscam soluções sub-ótimas, em razoável custo computacional.

O estudo de técnicas para programação da produção é bastante amplo, diversas heurísticas já foram aplicadas em trabalhos.

A utilização de algoritmo genético em processos de otimização da Engenharia de Produção já é bastante comum (LANDMANN *et al*, 2006). Segundo Falcone (2004), aplicações com AGs monopolizam estudos da otimização de cadeias de suprimentos e promovem soluções satisfatórias num tempo de cálculo considerado razoável computacionalmente.

Recentemente em Landmann *et al*. (2006) é aplicado algoritmo genético (AG) como mecanismo capaz de gerar resultados satisfatórios, comparados a outras meta-heurísticas aplicadas no mesmo problema, tanto em termos equilibrar a utilização da capacidade, quanto de não ultrapassar esta capacidade.

Como visto em Quezado *et al*. (1999), otimização do sequenciamento da produção faz parte da classe de problemas combinatórios de difícil resolução: os problemas NP-completos que segundo Varela (2007) também caem dentro do âmbito de resolução dos AGs. Nota-se, que aplicação de AGs em problemas de

múltiplos objetivos tem retornado resultados satisfatórios em sistemas produtivos para escalonamento de tarefas.

Em Oliveira e Shimizu (2004) é visto a utilização de AGs no tratamento de um problema de programação de tarefas em *Job Shop* Dinâmico, onde é possível reprogramar a cada nova entrada no sistema. Já em Landmann *et al.* (2006) é aplicado AGs na resolução de um problema aplicado de programação da produção em empresas metalúrgicas para otimizar a utilização da carga máxima do forno.

Em Ribeiro (2006) é apresentado um Sistema Imune Artificial (SIA) que trata a resolução do problema de escalonamento de *Job Shop*, com o uso de Algoritmo Genético para geração dos indivíduos a serem escalonados. Na pesquisa os resultados alcançados não atingiram a solução ótima conhecida, mas demonstrou eficiência para o tratamento de pequenas mudanças realizadas no ambiente produtivo.

4.3.1 – Algoritmos Genéticos para Problemas Multiobjetivo

O estudo inicial de tratamento de problema multiobjetivo com a utilização de AG como método de resolução, teve sua origem em Schaffer (1985). Entretanto, é a partir de Goldberg (1989) que se difundiram os estudos provenientes dessa matéria.

A partir deste momento muitas pesquisas se iniciam utilizando AGs para resolução de problemas de vários objetivos e em diversas áreas do conhecimento.

Em Fonseca & Fleming (1993), um procedimento de ordenação não-dominância é apresentado, para realização da seleção dos indivíduos da população, o chamado *Multi-objective Optimization Genetic Algorithm* (MOGA), onde todos os cromossomos são verificados pelo Algoritmo, e assim, indivíduos não-dominados serão colocados na primeira posição, os demais sofrem penalização através do posicionamento, que fica relacionado à quantidade de indivíduos que os dominam.

Em Coello (1999), é visto que a utilização do método de soma ponderada é um dos mais utilizados nos problemas de múltiplos objetivos. Ainda em sua pesquisa é referenciada como razão fundamental dos AGs nesses tipos de problemas, pelo fato de trabalharem com um conjunto de soluções possíveis e eficientes na mesma iteração do algoritmo, isto é, simultaneamente.

Na pesquisa de Castro (2001), é proposto que a utilização de AGs, em problemas de resolução multiobjetivo possuem as seguintes finalidades: guiar uma busca direcionada ao conjunto de soluções não-dominadas e manter uma diversificação na população eficiente do problema.

Ainda na pesquisa de Castro (2001), observa-se a argumentação que em muitas aplicações reais são realizadas simplificações do problema original de forma que, combinação de vários objetivos, remontem uma única função. Ou então, tratem de escolher o objetivo com maior prioridade de extremização, que normalmente é o custo.

Pode se citar ainda a pesquisa de Ticona (2003), na utilização de a AGs em problema multiobjetivo de alinhamento de sequências biológicas, pesquisa que buscou encontrar um conjunto de soluções que representem um compromisso entre a extensão e a qualidade das soluções para os critérios de avaliação. O autor aborda que o algoritmo permitiu encontrar tanto as melhores soluções como a maior diversidade possível delas.

Como visto, a aplicação de AGs é vasta e podemos destacar recentes estudos ao tema. Um exemplo a citar é o problema multiobjetivo para localização de antenas de transmissão para internet, visto em Siliprande *et. al* (2008). Nesta pesquisa é possível evidenciar que o tratamento com AGs em problemas de múltiplos objetivos e com características de resolução combinatórias estão presentes em estudos atuais.

Capítulo 5 – Otimização e Programação Multiobjetivo

"Neste capítulo será apresentada uma visão geral da programação matemática para otimização e uma visão de programação multiobjetivo: introdução, métodos e parâmetros."

Os problemas característicos de otimização apresentam conceitos e definições largamente conhecidas na literatura e de necessidade fundamental para o conhecimento desses tipos de problemas. As definições básicas do problema de otimização serão apresentadas nesta pesquisa. Na Figura 5.1 é representado o problema clássico de otimização visto em Castro (2001).

<u>Problema Clássico de Otimização</u>	
Max. ou Min.	$f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ (função objetivo)
sujeito a	
$g_j(\mathbf{x}) \geq 0$	$j = 1, 2, \dots, J$ (restrições de)
$h_k(\mathbf{x}) = 0$	$k = 1, 2, \dots, K$ (comportamento)
$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)}$	$i = 1, 2, \dots, N$ (restrições laterais)
	(nas variáveis)
	(de projeto x_i)

Figura 5.1 – Problema Clássico de Otimização (CASTRO, 2001).

5.1 – Definições

Baseadas nas definições propostas por Castro (2001) são apresentadas a seguir as informações básicas dos problemas de otimização. São elas:

Variável: as variáveis são aqueles elementos que se modificam durante o processo de otimização. Elas podem ter representações contínuas (reais), inteiras ou discretas.

Restrições: as restrições são funções de igualdade ou desigualdade que descrevem situações indesejáveis ao problema.

Espaço de Busca ou Região Viável: conjunto, espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis do problema a ser otimizado. Deve ser definido pelo atendimento as funções de restrição, que definem as soluções viáveis do problema a ser resolvido.

Função Objetivo ou de Avaliação: função que se deseja otimizar. Ela pode ser construída com uma ou mais variáveis, sendo estas duas opções classificadas na literatura como otimização unidimensional e multidimensional respectivamente.

Ponto Ótimo: ponto caracterizado pelo vetor $x^* = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, formado pelas variáveis do problema que extremizam a função objetivo no espaço de busca e satisfazem as restrições.

Valor Ótimo: valor da função objetivo $f(x^*)$ no ponto ótimo.

Solução Ótima: par formado pelo ponto ótimo e o valor ótimo $[x^*, f(x^*)]$.

5.1.1 – Otimização Simples x Otimização Multiobjetivo

Otimização com simples objetivo, conotam problemas que possuem um único valor ótimo a ser encontrado. Otimização com múltiplos objetivos englobam problemas com múltiplos valores a serem avaliados, sendo que normalmente nenhum dos melhores valores encontrados serão superiores aos demais, considerando-se todos os objetivos simultaneamente.

5.2 – Exemplos de Problemas Multiobjetivo

Veja que muitos exemplos podem ser citados e abordados para problemáticas reais com multiobjetivo, uma exemplificação primária é aqui tratada. Imagine-se que ao comprar um carro o cliente (agente decisor) deseje adquirir o produto baseado nos seguintes objetivos: maior capacidade de armazenagem do porta-malas; melhor desempenho na aceleração; menor consumo de combustível (km/l) e menor preço. Nota-se que estes objetivos serão conflitantes por natureza.

Outro exemplo para compreensão e entendimento destes problemas, é descrito agora: em uma empresa que deseja minimizar a taxa de acidentes; maximizar o desempenho produtivo e reduzir o custo. Novamente existe a evidência de possíveis conflitos, onde uma melhora no desempenho produtivo com custos mínimos pode ocasionar relativo aumento de riscos.

Imagine então um problema em que um candidato (agente decisor) pretende escolher uma vaga de emprego baseando-se nos seguintes objetivos: salário inicial; localização do trabalho e oportunidades associadas ao mesmo. Note-se que este problema não se caracteriza conflitante por natureza, porém seria uma tremenda sorte o candidato encontrar uma solução que satisfaça a todos os critérios, isso iria depender muito de suas atuais condições (restrições ao problema), mais do que as condições já definidas para decisão no emprego.

Às vezes então deseja-se obter objetivos bastante distantes de serem alcançados como ideal. Como exemplo pode-se citar a compra de uma casa, onde dois objetivos básicos devem ser alcançados, preço e conforto do imóvel. Esse é um problema que se deve ponderar ou restringir alguns aspectos para decisão, pois não será possível encontrar um imóvel com mínimo preço e com qualidade maximizada.

Então é possível entender que problemas de otimização multiobjetivo têm como característica fundamental não prover apenas uma solução básica ideal para seus diversos objetivos, mas sim propiciar a um determinado decisor um leque de opções para identificação de qual é mais importante para cada aspecto necessário no momento que é consultado.

5.3 – Análise e Decisão Multiobjetivo

A análise de problemas de otimização multiobjetivo possui características próprias em cada caso aplicado, isto é, vale muito da experiência de um agente de decisão para estes tipos de problemáticas, onde o mesmo deve conhecer a fundo os aspectos fundamentais do sistema, a fim de gerar boas soluções, ou mesmo soluções satisfatoriamente ótimas para os mesmos.

Para analisar e decidir sobre problemas de programação multiobjetivo seria interessante conhecer os melhores resultados possíveis de obter dentro do conjunto

de soluções, que são as soluções não-dominadas ou Pareto-ótimas. Na literatura são conhecidas como soluções pertencentes à fronteira de Pareto. Nesse conjunto de soluções que se encontram as soluções eficientes para o espaço de decisão que são, como dito anteriormente, as soluções não-dominadas para o espaço dos objetivos.

A problemática multiobjetivo consiste então em determinar funções Pareto-ótimas ou mais eficientes para o agente de decisão. Como essa condição é bastante complexa e talvez não forneça a melhor solução satisfatória ao problema em tempo computacional relativamente baixo (próximo a instantaneidade), o mesmo deverá utilizar-se de alguns mecanismos para encontrar soluções de elite (ARROYO e RIBEIRO, 2004), que por ventura pode servir de base para tomar a decisão adequada.

A Figura 5.2 representa a fronteira de Pareto, para um determinado tipo de problema bi-objetivo de minimização. Já a Figura 5.3 representa as soluções elite para um problema também bi-objetivo de minimização, isto é, seria uma representação gráfica que visa diferenciar essas duas técnicas.

Note-se que no elitismo não é garantido que as soluções estarão dentro do ponto mais externo (fronteira) do conjunto de soluções, ou seja, as soluções não-dominadas. Porém, este fato indica que uma aproximação destes pontos é possível, mesmo que o agente decisor não saiba o quanto próximo ele está. Assim o emprego de AGs como método de resolução não irá garantir a melhor solução do problema, mas, no entanto, é possível conseguir resultados sub-ótimos em tempo relativamente baixo.

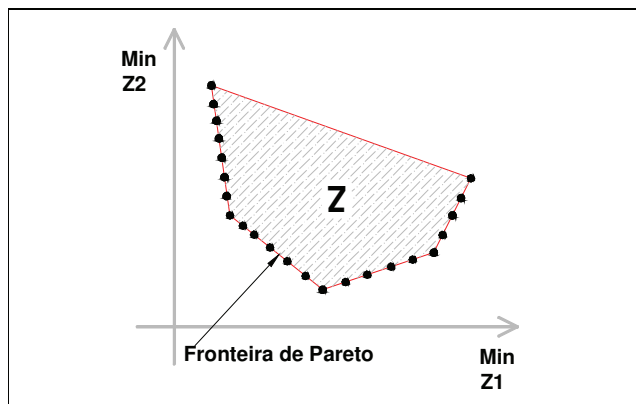


Figura 5.2 – Fronteira de Pareto (soluções não-dominadas do problema).

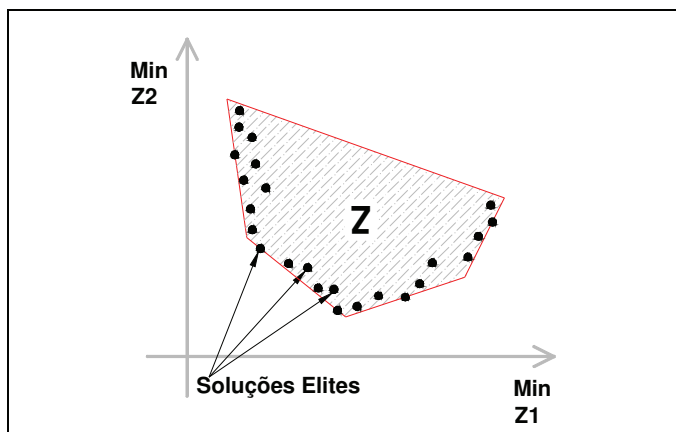


Figura 5.3 – Soluções Elite (soluções não-dominadas encontradas).

A maior parte dos problemas encontrados no mundo real são caracterizados por envolverem múltiplos objetivos, isto é, tratar de problemas reais envolve a necessidade de otimizar várias funções objetivo ao mesmo tempo. O que normalmente ocorre é um estado de conflito entre os objetivos a serem otimizados, ou seja, otimizar uma função pode afetar diretamente o desempenho da outra e vice e versa entre todos os objetivos encontrados no problema a ser solucionado.

Assim as tomadas de decisão em otimização multiobjetivo envolvem diversos critérios, que podem ser medidos em quantidade e/ou qualidade para entendimento de sua solução. São considerados problemas propícios a conflitos por natureza, pois podem englobar necessidades de minimização e maximização bastante divergentes. Para essa difícil tarefa decisória, torna-se necessária a utilização de mecanismos que auxiliem a sua escolha, que podem ser ferramentas determinantes na consideração de fatores relevantes no que afetam a decisão.

Tomar decisões implica em um processo de vários fatores, que tem como objetivo encontrar a solução ideal (TICONA, 2003). Às vezes várias soluções são encontradas, porém nenhuma é satisfatoriamente superior a outra, o que implica em uma necessidade da utilização de um agente de decisão, que deve aplicar seus conhecimentos para aproximar-se de uma solução adequada para o problema.

Os problemas multiobjetivos podem ser resolvidos, ou seja, calculados baseados em diversos métodos de soluções exatas. Alguns deles, amplamente conhecidos na literatura, são o restritivo e ponderado. Ou ainda basear-se em soluções sub-ótimas consideradas satisfatórias ao problema, caso muito comum e

bem aceito para problemas reais, como visto em Zhou *et al.* (2001), principalmente quando trata-se da utilização de algoritmos evolucionários ou aleatórios como método de resolução do problema.

Na pesquisa tentou-se criar condições de paradas alternativas que facilitam a tomada de decisão do agente, onde alguns aspectos devem ser considerados em relação aos objetivos a serem alcançados. Houve então a idéia de misturar esses critérios alternativos entre, ponderação de objetivos, condição de satisfação de objetivos e controle do tempo computacional. Ambos os métodos tratados na pesquisa encontram soluções elitistas consideradas satisfatórias ao problema.

5.4 – Métodos para Problemas Multiobjetivo

Dentro do universo possível de aplicações de métodos de resoluções para problemas multiobjetivo, que visem transformar esses problemas em monoobjetivo, na pesquisa é selecionado e apresentado três deles como exemplificação para entendimento do tema. São eles: o método de ponderação das funções; o método de restrição ou satisfação de direta de determinados objetivos e o método de AGs multiobjetivo.

O método ponderado pode ser descrito como uma determinação de pesos definidos para os objetivos, a fim de aplicar uma importância alta para as funções que têm valor mais desejado, e penalizar aquelas que podem ser consideradas de baixa relevância. Esse peso é conhecido como *lambda*. Nesse tipo de método o problema tratado passa a ser monoobjetivo, isto é, as funções objetivo do problema formam apenas uma nova função, que é construída e baseada pelas diversas funções, só que cada qual com seu peso agregado.

Outro método é o restritivo, que realiza uma satisfação direta de um ou vários pré-determinados objetivos. Isto é, se deseja encontrar uma solução que satisfaça a uma condição empregada a um ou vários objetivos simultaneamente, e que seja a melhor encontrada para o objetivo livre. Neste caso, também é transformado o problema em resolução monoobjetivo.

Os AGs multiobjetivos englobam os dois conceitos anteriores e ainda agregam outras práticas para encontrar boas soluções em tempo e consumo

computacional relativamente baixo, em tempos atuais. Nota-se que o principal aspecto nesse método é a resolução por meio de soluções sub-ótimas aos problemas. Como visto na Figura 5.3, eles buscam as soluções elite do problema, o que indica que são as melhores soluções não-dominadas encontradas, mas não podem garantir que essas são as melhores do problema.

Na utilização de AGs é possível utilizar-se soluções monoobjetivos para resolver os problemas ou mesmo fazer uma análise dos demais objetivos em conjunto, podendo então ser aplicados os três métodos conjuntamente, métodos esses aqui descritos acima (ponderado, restritivo e AGs), como auxiliares dos critérios de avaliação do agente decisor.

5.5 – Critérios Alternativos para Problemas Multiobjetivo

O controle do tempo computacional ajuda na solução instantânea ou *online*, onde se restringe o tempo máximo de execução do algoritmo, não importando por tanto a quantidade de gerações a serem executadas ou mesmo se um objetivo ou outro já está satisfatoriamente encontrado. Na pesquisa considera-se o tempo máximo de 20 minutos para execução satisfatória do problema.

Os critérios de parada alternativos do algoritmo implicam em encontrar uma solução que atenda a um determinado critério a ser satisfeito, sendo possível a definição de todos os critérios ao mesmo tempo. E quando um deles for satisfeito, a execução do algoritmo é encerrada e a solução elite do momento de melhor desempenho para cada objetivo é apresentada. Sendo assim, não importa se um objetivo foi ou não satisfeito, será apresentada a solução que melhor atendeu a ele a aos demais. O que isso tem de importante, é que uma solução foi encontrada satisfazendo algum desejo para um determinado critério de parada definido.

Segundo Clímaco, *et al.* (2003) os principais métodos dedicados a programação multiobjetivo podem ser classificados das seguintes formas: articulação *a priori*, *a posteriori* e progressiva. As articulações *a priori* consistem em partir a execução do método com pesos ou valores restritivos já pré-fixados, que indica uma aplicação dependente de um conhecimento prévio do agente de decisão na influência de suas soluções, também utilizado no passado devido a dificuldades computacionais em rodar diversas vezes um modelo.

Para a classificação *a posteriori*, o agente de decisão executa os pesos ou valores restritivos após conhecer as soluções do problema, o que se torna necessário para uma nova execução. Já a classificação progressiva indica que a cada execução do método um estudo é realizado a fim de analisar de maneira adequada as soluções. Este método torna-se mais importante na atual conjuntura, devido às facilidades computacionais que propiciam a execução desses modelos, caso muito dificultado no passado.

Todos os métodos utilizados nos problemas multiobjetivos pelos agentes decisores têm como característica a redução das soluções, ou seja, aproximação de uma solução única ideal, que na maior parte das vezes não é encontrada, mas sim um conjunto que serve como ponto de partida para análise e resolução do problema proposto.

Pode-se definir que as metas para uma otimização multiobjetivo é a busca por um conjunto de soluções mais próximas da Fronteira de Pareto e mais diversificadas quanto possível, ou seja, como citado acima, uma busca por boas soluções elite do problema. Esse critério pode ser entendido como tentativa da Otimalidade de Pareto, quando se tem então um conjunto finito de soluções e podemos fazer comparações entre elas determinando as soluções dominadas e não-dominadas. Na Figura 5.2 foi ilustrado o conceito de Fronteira de Pareto e na Figura 5.3 um conceito similar, utilizando-se das soluções elite.

A Figura 5.2, que retrata o conceito da Fronteira de Pareto, pode ser entendida da seguinte forma: os elementos mais externos ou fronteiros não-dominados representam as soluções Pareto Ótimas. Note-se que essa Figura está retratando um problema de minimização onde os pontos são as soluções não-dominadas de um problema multiobjetivo. Para o conceito similar adotado na Figura 5.3 se pode entender como representantes da Fronteira de Pareto do problema as soluções encontradas pelo processo de elitismo.

Em problemas complexos que se utilizam de algoritmos genéticos como método de resolução, dificilmente poderá ser garantida que uma solução está inserida na Fronteira de Pareto, por esse motivo cabe ao agente decisor determinar

a condição para que a solução encontrada (solução elite) seja considerada satisfatória ao ambiente de produção.

Para tanto, os problemas multiobjetivos estão cada vez mais sendo solucionados por esse tipo de heurística não-exata, devido a sua capacidade de retratar problemas de alta complexidade computacional com velocidade satisfatória e tempo de resposta para uma solução sub-ótima, ou seja, que atenda às necessidades que o agente decisor procura instantaneamente.

Capítulo 6 – O Algoritmo Proposto

“Neste capítulo é descrito e explicado o Algoritmo Proposto na pesquisa.”

A primeira questão que é desejável responder é a seguinte: é possível aproveitar todo conhecimento de produção deste sistema em estudo para desenvolver um Algoritmo que possa melhorar o desempenho da produção? Assim, o Algoritmo desenvolvido mostra as preocupações da empresa em conhecer melhor sua capacidade de produção e fazer um controle eficaz deste sistema, e ai sim promover uma melhoria continua em seu desempenho, conseguindo reduzir alguns desperdícios cotidianos como: estoques, atrasos, ociosidade e *setup*.

Para a construção do Algoritmo de sequenciamento da produção sob encomenda, foram considerados alguns requisitos necessários e inicialmente básicos para seu desenvolvimento. São eles:

- a) Esse Algoritmo tem por principio escalonar o máximo de OPs tanto quanto possível e de maneira satisfatória (testes computacionais apresentarão os resultados para algumas quantidades pré-estabelecidas e utilizadas para um horizonte de aproximadamente uma e duas semanas);
- b) As OPs utilizadas neste trabalho poderão ser necessárias passar em uma ou duas máquinas do setor. Sendo que às vezes possuem uma prioridade na execução das tarefas em relação a outra e também possuem diversos recursos necessários (são necessários para executar as tarefas) para execução das mesmas;
- c) O Algoritmo trata a resolução de OPs de duas máquinas do setor produtivo. Essas máquinas foram escolhidas devido ao fato de serem os gargalos do sistema atual, ou seja, foram abordadas as duas máquinas mais críticas e que devem ser trabalhadas eficazmente para evitarem atrasos e desperdícios;
- d) Os recursos (ferramentas) são descritos na Figura 2.9, possuindo relação ao tipo de tarefa a ser executada e a máquina (Figura 2.8) a qual será utilizada (ver possíveis tarefas disponíveis para o Torno e Mandrilhadora Figura 2.10);
- e) As sequências, de cada OP, devem ser respeitadas, ou seja, quando o produto possuir prioridade, deverá ser seguida. Porém, em alguns casos essa prioridade não existe ou é livre, sendo assim, as OPs poderão ser executas primeiramente em qualquer uma das máquinas do setor produtivo;

f) Utilização de algoritmo genético como método de resolução do problema e utilização da linguagem ObjectPascal aplicada na IDE Delphi 7.0 para desenvolvimento do Algoritmo.

Sendo assim, o Algoritmo de sequenciamento da produção desenvolvido e abordado nessa pesquisa, trata um problema bastante complexo e com restrições a serem consideradas em seu processo de desenvolvimento.

6.1 – Funcionalidade do Algoritmo

A Figura 6.1 mostra o fluxograma que descreve o esquema de funcionamento do algoritmo desenvolvido por este estudo.

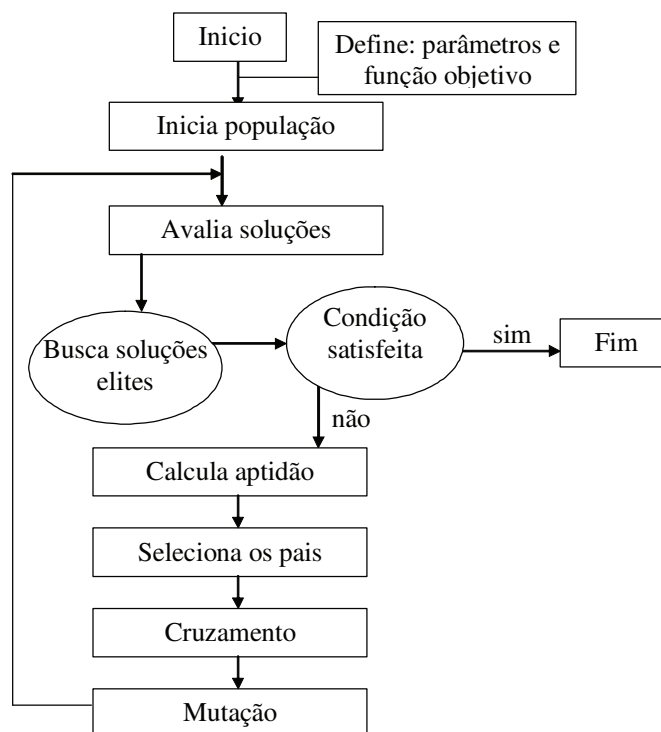


Figura 6.1 – Fluxograma básico do algoritmo genético proposto.

A Figura 6.1 deixa evidente como ocorre o funcionamento do Algoritmo. Inicialmente, o agente decisor define os parâmetros do Algoritmo, que podem ser: tamanho da população; número máximo de gerações; probabilidade de cruzamento; probabilidade de mutação; critérios de parada; pesos da função de aptidão. Caso o agente trabalhe com cenário real, deverá preencher os dados de entrada do algoritmo, se não poderá gerar essas informações aleatoriamente.

Após a definição dos parâmetros iniciais, o agente decisor inicializa a população de modo que a quantidade seja definida, e essa definição é baseada em experiências anteriores, ou mesmo, utiliza-se o valor padrão do algoritmo, isto é, 200. A criação da população inicial dos cromossomos é gerada de maneira aleatória, sendo formados os cromossomos baseados nas OPs disponíveis, ou seja, cada cromossomo gerado representa uma determinada sequência de produção das OPs. Nesta geração, podem ocorrer cromossomos classificados como inválidos, ou seja, que não satisfazem à restrição de precedência do problema.

A população inicial corresponde aos pais iniciais dos cromossomos, nos quais serão avaliados e selecionados pelo algoritmo proposto. A Figura 6.2 apresenta o algoritmo do procedimento de geração de população inicial, isto é, a população atual. Neste mesmo procedimento a função de avaliação de cada solução é calculada, gerando as primeiras soluções do problema.

```

GeraPopAtual;
Inicio
  i := 1;
  Enquanto i <= TamanhoPop Faça
  Inicio
    j := 1;
    Enquanto j <= NumeroOps Faça
      CromPopAtual[ i,j ] := Aleatório (1,NumeroOps);
      j := j+1;
    Fim {Enquanto}
    i := i+1;
  Fim {Enquanto}
  Avaliação(PopAtual); //Chama função de avaliação
Fim {GeraPopAtual}

```

Figura 6.2 – Procedimento de geração da população inicial.

Na Figura 6.3 pode ser visualizada a função de avaliação, que calcula inicialmente se a solução atende a restrição de precedência. Após, são realizados os cálculos pertinentes aos objetivos do sistema de produção. São eles: tempo de *setup*; caminho crítico; custo de produção; custo com atraso; função multiobjetivo (ponderada entre os quatro objetivos).

Ainda na função de avaliação, é verificado se o cromossomo testado corresponde a uma solução elite do problema. As soluções elite são os

cromossomos considerados válidos que possuem as melhores soluções encontradas até o momento, para um ou vários objetivos do sistema de produção.

```

Avaliação(PopAtual):Avaliação;
Início
  Enquanto i <= TamanhoPop Faça
  Início
    j := 1;
    Enquanto j <= NumeroOps Faça
      Avaliação := CromPopAtual[ i,j ]*Parametros;
      VerificaSolucaoElite(Avaliação);
      j := j+1;
    Fim {Enquanto}
    i := i+1;
  Fim {Enquanto}
Fim {FuncaoAvaliação}

```

Figura 6.3 – Função de Avaliação.

Seguindo o fluxograma, o algoritmo busca encontrar as soluções elite que possam ser as soluções satisfatórias do problema proposto, logo, é testado se o cromossomo corresponde a uma solução elite e, se o for, ele será armazenado.

Após gerar todas as soluções iniciais e testar se correspondem a soluções elite, são realizados testes para verificar se essas soluções atendem aos critérios de parada, caso ocorra, o Algoritmo encerra sua execução e apresenta as soluções encontradas. Se não ocorrer, serão selecionados novos pais para geração de novos cromossomos.

Na continuação do algoritmo é chamada a função Torneio, que recebe os três primeiros candidatos a pai, que são selecionados aleatoriamente da população atual. Faz-se os testes para escolha do melhor de acordo com a função de aptidão aplicada, depois é realizado o mesmo procedimento para escolha do segundo pai.

A função Torneio é chamada até que todos os pais sejam selecionados para formação da nova geração. Na Figura 6.4, pode se observar o algoritmo desta função. Já na Figura 6.5 é possível visualizar graficamente como é o comportamento do algoritmo em sua primeira iteração nessa função, sendo que na segunda iteração o mesmo procedimento é repetido, ou seja, é selecionado o segundo pai.

```

Torneio(PopAtual): Pais;
Início
  i := 1;
  Enquanto i <= 2 Faça
  Início
    repita
      c1 := Aleatório (1,TamanhoPop);
      c2 := Aleatório (1,TamanhoPop);
      c3 := Aleatório (1,TamanhoPop);
    até (c1 <> c2) e (c1 <> c3) e (c2 <> c3);
    se Aptidão(PopAtual[c1]) mais apto que (Aptidão(PopAtual[c2]) e
    Aptidão(PopAtual[c3])) então
      Pai[i] := PopAtual[c1];
    senão
      se Aptidão(PopAtual[c2]) maior (Aptidão(PopAtual[c1]) e
      Aptidão(PopAtual[c3])) então
        Pai[i] := PopAtual[c2];
      senão
        Pai[i] := PopAtual[c3];
    i := i + 1;
  Fim {Enquanto}
Fim {Torneio}

```

Figura 6.4 – Função Torneio.

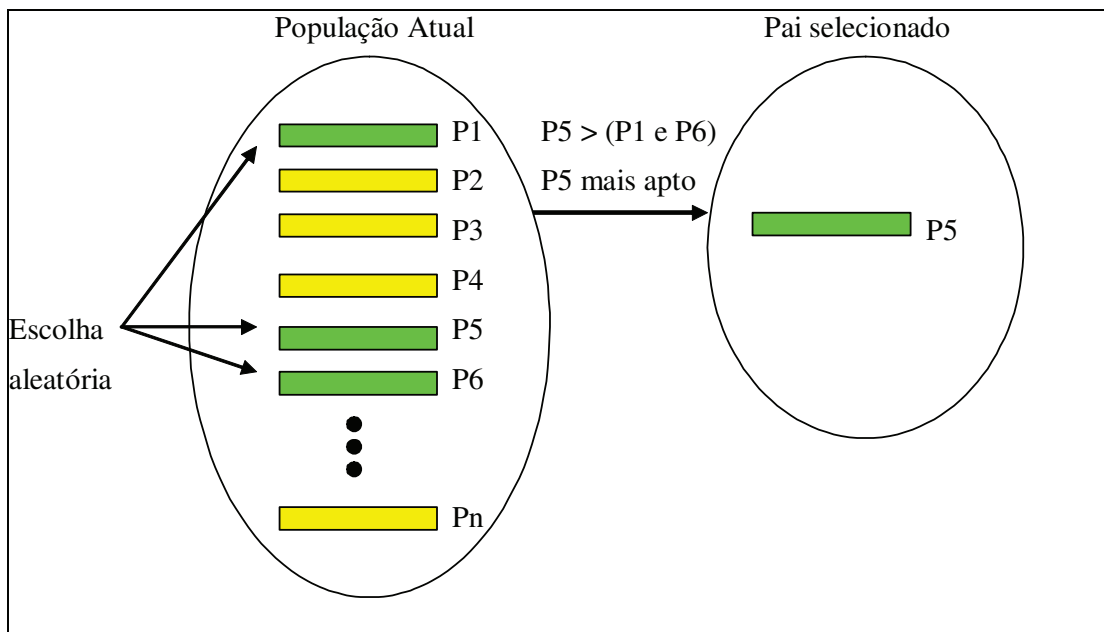


Figura 6.5 – Representação gráfica da Função Torneio.

Para a escolha dos indivíduos que serão os pais geradores de descendentes, é chamada a função de aptidão que por sua vez tem a característica de promover uma representação mais adequada dos indivíduos capazes de gerar descendentes

válidos, isto é, a expectativa dessa função é poder ter uma chance maior a cada novo cruzamento de gerar indivíduos que possam representar solução para o problema. Nem sempre a viabilidade das soluções descendentes é possível, porém essa função tenta minimizar a cada geração o número de soluções inválidas. Na Figura 6.6 é apresentado o algoritmo dessa função.

```
Aptidão(PopAtual[ x ]):Aptidão;
Início
  Aptidão := PopAtual[ x ]*Critérios de viabilidade;
Fim {FuncaoAptidão}
```

Figura 6.6 – Função de Aptidão

Selecionados os pais, serão gerados os descendentes caso o critério de probabilístico de cruzamento seja atendido. O critério é um parâmetro de valor entre 0 a 1, definido pelo agente decisor na tela do Algoritmo. A probabilidade de ocorrer o evento é realizada da seguinte forma: é gerado um número aleatório de valor entre 0 a 1, testando-se o mesmo corresponde a um valor menor que o escolhido pelo agente.

Caso o critério não será atendido, o primeiro descendente será formado pelo primeiro pai escolhido na função de aptidão e, o segundo, formado pelo segundo pai. Isto é, será realizada uma cópia dos pais nesses novos indivíduos gerados. Um entendimento gráfico do seu funcionamento poderá ser visualizado nas Figuras 7.9 e 7.10, posteriormente nesse, trabalho.

Seguindo o algoritmo, a função de mutação é chamada, caso semelhante à função de cruzamento é aplicado na mesma, ou seja, existe uma condição probabilística para que seja executada a função, isto é, realizar a mutação no cromossomo em evidencia, que é o novo individuo que acaba de ser gerado pelo cruzamento.

Essa mutação decorre da troca de posições das OPs no cromossomo. E caso o critério de probabilidade não seja atendido, a mutação não ocorre e o descendente se mantém inalterado. A Figura 7.11, ilustra a mutação e serve para entendimento de como ocorrem essas mutações nos cromossomos.

Realizada a mutação, o algoritmo volta a execução da função de avaliação, onde novamente é verificado se os cromossomos representam soluções elite e todo esse processo é reiniciado, até que algum critério de parada seja alcançado e aí sim finaliza a execução do algoritmo e é apresentada as soluções encontradas.

6.2 – Interface Gráfica do Algoritmo

Toda ferramenta computacional possui uma *interface* para comunicação com o usuário do algoritmo, isto é, a tela ou janela onde o mesmo pode trocar informações com a aplicação. Na Figura 6.7, é apresentada a *interface* gráfica do Algoritmo que foi desenvolvido nesta pesquisa.

Na parte superior e lateral direita da tela representada na Figura é possível identificar os parâmetros utilizados pelo agente decisor no algoritmo, na parte central os dados das ordens de produção, sejam eles gerados aleatoriamente ou baseados em um sistema de produção real e na parte inferior todas as soluções são representadas, desde as iniciais até as elites. A tela possui abas que podem ser usadas para preencher outros parâmetros aqui não demonstrados e também visualizar os cromossomos gerados.

Algoritmo de Escalonamento da Produção Sob Encomenda

Gera Parâmetros: Número de OP's: 18

Tamanho da população: 200

No. máximo de gerações: 500

Probabilidade de cruzamento: 0,95

Probabilidade de mutação: 0,35

Cenário de estudo: 0 1 2 3

Limpar

CRITÉRIOS DE PARADA ALTERNATIVOS

Função MultiObjetivo: 00

Tempo de Setups (min): 00

Caminho Crítico (min): 00

Custo de Produção Total (R\$): 00

Custo com atraso (R\$): 00

Tempo máx. cruzamento (s): 50

Pesos da F. Aptidão

Minimizar Setups: 0,1

Minimizar Tempo: 0,3

Minimizar Custos: 0,3

Minimizar Atraso: 0,3

Tipos de precedência: 0 1 2 3 4

TEMPO ESGOTADO

Códigos	Quant. Dep.	Tar Maq	Gens Maq	Tempo 1	Custos 1	Tar Maq 2	Gens Maq 2	Tempo 2	Custos 2	Prazo de Entrega	Custo Atraso
Rd32	6	3	JFKJ	6/Rd32/JFKJ	96	158,4					
Be02	8	1	KFJ	8/Be02/KFJ	360	594	M	8/Be02/M	285	470,25	1306
Rc07	4	3	KJF	4/Rc07/KJF	400	660	NL	4/C02/M	160	264	2081
C02	4	1	JF	4/C02/JF	94	155,1	M	8/Cx02/NLO	272	448,8	856
Cx02	8	4	JK	3/Ep02/JK	588	970,2	M	3/Ep02/M	188	310,2	2122
Ep02	3	1	JK	3/Ep02/JK	588	970,2	NL	8/Cx02/NLO	272	448,8	2805
Rc02	8	3	FJK	8/Rc02/FJK	138	227,7	M	3/Ep02/M	188	310,2	1986
Es08	3	1	JK	3/Es08/JK	373	615,45	M	3/Es08/M	135	222,75	2081
M32	9	0	FJ	9/M32/FJ	570	940,5	DM	9/M32/DM	522	861,3	2616
Es02	2	4	JF	3/C32/JF	164	270,6	ON	2/E02/NLO	340	561	2522
C32	3	2	JF	3/C32/JF	164	270,6	ON	3/C32/ON	111	183,15	3400
Ab02	6	3	KFJ	6/Ab02/KFJ	90	148,5	NL	2/Be02/NL	356	587,4	2850
Bc02	2	4					NL	1/Ex02/NL	315	519,75	3467
Ex02	1	4					NL	2/Be02/NL	356	587,4	2600
P08	4	3	JKJK	4/P08/JKJK	122	201,3	DM	2/Gc25/DM	154	254,1	2085
Gc25	2	1	FJ	2/Gc25/FJ	132	217,8	ON	1/Ex02/NL	315	519,75	3081
Ch02	4	4					ON	4/Ch02/ON	176	290,4	450
V03	4	4					NL	4/V03/NL	332	547,8	920
											3200

Custos de fabricação

F	G	H	I	J
00,00	00,00	00,00	00,00	00,00
K	L	M	N	O
00,00	00,00	00,00	00,00	00,00

Ociosidade Máquina 1: 0,80

Ociosidade Máquina 2: 0,90

Setup Máquina 1: 1,20

Setup Máquina 2: 1,30

Obs: custos em R\$min

Obs: tempo em minutos, prazo em minutos e custos em R\$min

Tempo inicial

Maq 1: 0

Maq 2: 0

SAIR

Soluções Elites

4/R07/JKF - 2/Gc25/FJ - 8/Rd32/JFKJ - 8/Be02/KFJ - 4/C02/JF - 3/Ep02/JK - 3/Es08/JK - 8/Rc02/FJK - 6/Ab02/KFJ - 4/P08/JKJK - 9/M32/FJ - 3/C32/JF - 4/Ch02/ON - 1/Ex02/NL - 2/Be02/NL - 3/C32/ON - 9/M32/DM - 2/Gc25/DM - 8/Be02/M - 3/Ep02/M - 8/Cx02/NLO - 4/C02/M - 4/M03/NL - 3/Es08/M - 2/Es02/NLO MultiObjetivo= 4656,815 Tempos de Setups= 362 Caminho Crítico= 3841 Custo Total= 11761,05 Custo com Atraso= 297,8

4/R07/JKF - 2/Gc25/FJ - 8/Rd32/JFKJ - 8/Be02/KFJ - 4/C02/JF - 3/Ep02/JK - 3/Es08/JK - 8/Rc02/FJK - 6/Ab02/KFJ - 4/P08/JKJK - 9/M32/FJ - 3/C32/JF - 4/Ch02/ON - 1/Ex02/NL - 2/Be02/NL - 3/C32/ON - 9/M32/DM - 2/Gc25/DM - 8/Be02/M - 3/Ep02/M - 8/Cx02/NLO - 4/C02/M - 4/M03/NL - 3/Es08/M - 2/Es02/NLO MultiObjetivo= 5699,185 Tempos de Setups= 265 Caminho Crítico= 4643 Custo Total= 14265,95 Custo com Atraso= 2032,4

4/C02/JF - 8/Rd32/JFKJ - 3/Es08/JK - 3/Cr02/JF - 2/Gc25/FJ - 8/Be02/KFJ - 6/Ab02/KFJ - 4/Rc07/JKF - 8/Rc02/FJK - 4/P08/JKJK - 9/M32/FJ - 3/C32/ON - 8/Cx02/NLO - 4/M03/NL - 9/M32/DM - 8/Be02/M - 3/Es08/M - 4/Ch02/ON - 2/Es02/NLO - 2/Gc25/DM - 1/Ex02/NL - 3/Ep02/M - 2/Be02/NL - 4/C02/M Caminho Crítico= 3670 Gerações= 1

Figura 6.7 – Interface do Algoritmo de Escalonamento da Produção Sob Encomenda (AEPSE).

6.3 – Variáveis e Parâmetros do Algoritmo

Precedências de ordem de produção podem ser de cinco tipos diferentes, sendo que cada valor representa um tipo. No valor “0” não existe distinção entre as prioridades de execução da OP; valor “1”, deve necessariamente passar na máquina 1 antes da máquina 2; valor “2”, deve necessariamente passar na máquina 2 antes da máquina 1. Valor “3” somente será executada essa OP na máquina 1; valor “4” somente será executada essa OP na máquina 2.

Número de Ops: Ordens de produção a serem escalonadas no sistema. Valor possível de representação na aplicação desenvolvida 4 a 100.

Tamanho da população: Número de cromossomos. Valor pode ser representado variando 4 a 400, a critério do agente decisor.

Número de gerações: Valor representado a critério do agente decisor.

Tempo inicial de produção das máquinas podem ser iguais ou diferentes.

Tempo de *setup*: Somatório dos tempos gastos com *setup* na máquina 1 e 2.

Tempo de fabricação da máquina 1: Somatório de tempos de fabricação das OPs + Somatório de ociosidade + Somatório de tempos de espera + Somatório dos *setup*.

Tempo de fabricação da máquina 2: Somatório de tempos de fabricação das OPs + Somatório de ociosidade + Somatório de tempos de espera + Somatório dos *setup*.

Caminho crítico: Maior tempo de fabricação comparando Máquina 1 e Máquina 2.

Custo de Total: Somatório dos custos com atraso da máquina 1 e 2 + Somatório dos custos com *setup* da máquina 1 e 2 + Somatório dos custos com produção da máquina 1 e 2.

Tempo de execução: Tempo de funcionamento do Algoritmo. Usado como critério de parada alternativo.

Critérios de parada alternativos: Valores estipulados para soluções satisfatórias.

Capítulo 7 – Aplicação do Algoritmo

“Neste capítulo serão apresentados os dados que compõem o sistema bem como suas funcionalidades e aplicações dentro do Algoritmo. São descritos os métodos propostos para abordagem de uma aplicação real.”

De posse dos conhecimentos expostos e devidamente detalhados nos capítulos anteriores, os quais guardam inteira relação com a pesquisa, aqui são expostos em seus pormenores as características de aplicação de um estudo de caso no sistema real. Logo, esse estudo relaciona-se somente a uma comparação por simulação, que evidencia uma aplicação bem sucedida do algoritmo desenvolvido.

A Figura 7.1 exibe um exemplo de sequenciamento real que ocorreu no sistema produtivo. A intenção desta pesquisa foi desenvolver um algoritmo que seja capaz de gerar soluções satisfatórias, que sejam melhores e em tempo reduzido ao comparar-se com o sistema atual, que funciona de maneira manual.

Cenário Real de produção 1														
Máquina 1							Máquina 2							
Ordem	Início	Setup	Tempo	Final	Prazo	Atraso	Ordem	Início	Setup	Tempo	Final	Prazo	Atraso	
Rd32	0	0	96	96	1306	0	Ch02	0	0	176	176	450	0	
Be02	96	15	360	471	2081	0	Vi03	176	0	332	508	920	0	
Rc07	471	0	400	871	856	15	Be02	508	27	285	820	2081	0	
Ci02	871	11	94	976	2122	0	Cr32	820	40	111	971	2850	0	
Ep02	976	11	588	1575	1986	0	Ex02	971	0	315	1286	2065	0	
Rc02	1575	13	138	1726	2081	0	Mi32	1286	29	522	1837	2522	0	
Es08	1726	15	373	2114	2616	0	Ep02	1837	0	188	2025	1986	39	
Mi32	2114	13	570	2697	2522	175	Ci02	2025	0	160	2185	2122	63	
Cr32	2697	0	164	2861	2850	11	Bc02	2185	34	356	2575	2600	0	
Ab02	2861	13	90	2964	3467	0	Es08	2575	27	135	2737	2616	121	
Pz08	2964	0	122	3086	3081	5	Cx02	2737	34	272	3043	2805	238	
Gc25	3086	13	132	3231	3430	0	Ee02	3043	33	340	3416	3400	16	
Tempo de espera:	0		Custo com espera:		0		Tempo de espera:	0		Custo com espera:		0		
Tempo de setups:	104		Custo com setups:		124,8		Tempo de setups:	224		Custo com setups:		291,2		
Tempo de atraso:	206		Custo com atraso:		82,4		Tempo de atraso:	617		Custo com atraso:		246,8		
Tempo de produção:	3127		Custo com produção:		5159,55		Tempo de produção:	3346		Custo com produção:		5855,5		
Tempo total:	3231		Custo na máquina 1:		5366,75		Tempo total:	3570		Custo na máquina 2:		6393,5		
Valor em R\$/min por espera:	0,8		Valor em R\$/min por espera:		0,9		Valor em R\$/min por setup:	1,3		Valor em R\$/min por atraso:		0,4		
Valor em R\$/min por setup:	1,2		Valor em R\$/min por setup:		1,75		Valor em R\$/min por produção:	1,75		Tempo de setups máquina 1 + tempo de setups máquina 2		328		
Valor em R\$/min por atraso:	0,4		Tempo de setups máquina 1 + tempo de setups máquina 2		328		Caminho crítico:		3570		Maior tempo de produção entre as duas máquinas		3570	
Valor em R\$/min por produção:	1,65		Custo de produção total:		11760,25		Custo na máquina 1 + custo na máquina 2		329,2		Custo com atrasos na máquina 1 + custo com atrasos na máquina 2		329,2	

Figura 7.1 – Cenário Real de Produção 1.

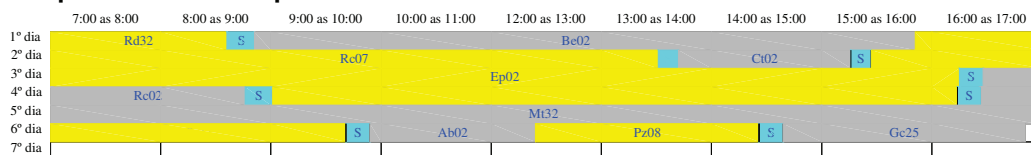
Este cenário produtivo possui 19 ordens de produção para serem escalonadas em duas máquinas do setor produtivo. Sendo que cada uma possui as suas próprias características relativas a tempo, custo e prioridade.

Posteriormente, no Capítulo 8, serão realizados os testes computacionais com este cenário exposto e será apresentado mais um cenário de estudo com a intenção

de encontrar as soluções satisfatórias, evitando-se o sequenciamento realizado de maneira manual, hipótese que ocorre neste sistema de produção na atualidade.

A Figura 7.2 ilustra outra representação do cenário de produção, onde o sequenciamento pode ser entendido mais facilmente, devido as características visuais dessa representação. No entanto, essa representação limita-se apenas a sequência produtiva das ordens apresentadas no cenário visualizado na Figura 7.1.

Sequenciamento Máquina 1



Sequenciamento Máquina 2

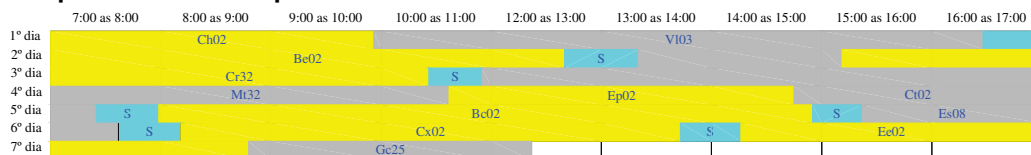


Figura 7.2 – Sequência de produção do Cenário Real de Produção 1.

7.1 – Representação do Cromossomo

Para Mazzucco (1999), uma utilização eficaz dos algoritmos genéticos em resolução de problemas depende muito de encontrar uma forma apta de representação das soluções válidas do problema em formato de cromossomo e a determinação de uma função que possa medir um valor a fim de avaliar cada cromossomo gerado no problema.

Nesse estudo a representação do cromossomo seguiu a seguinte característica: trabalhar com um conjunto de dados que referenciam as características das OPs encontradas no sistema produtivo.

Na Figura 7.3, são mostrados exemplos de dados de entrada do Algoritmo, que foram retirados de ordens de produção destinadas à máquina Torno A. Estes dados de entrada servem somente para entender a representação dos cromossomos gerados, ou seja, são ilustrativos aos dados utilizados nos testes

computacionais. Os dados reais tratam de cenários pré-estabelecidos que ocorreram no sistema produtivo da empresa DJM, objeto de estudo da pesquisa.

Dados de entrada					
Quant.	Código	Tarefa	Tempo	Tempo Setup	
2	CG8	JF	0:50	S-INICIAL	0:06
4	CG9	EG	0:40	S-FE	0:10
2	CG10	E	0:23	S-GE	0:04
1	CG11	JI	0:35	S-EJ	0:07
1	CG12	G	0:35	S-IG	0:22
1	CG13	EFJ	0:30	S-GE	0:04

Figura 7.3 – Dados de entrada.

A Figura 7.4 apresenta uma analogia aos dados apresentados anteriormente na Figura 7.3, só que em uma visão mais aproximada de uma sequência de produção. O propósito neste caso é sequenciar essas tarefas e demonstrar as características das informações que levaram a representação do cromossomo.

Quantidade	2		4		2		1		1		1	
Código peça	CG8		CG9		CG10		CG11		CG12		CG13	
Tarefas	S-Inicial	T-JF	S-FE	T-EG	S-GE	T-E	S-EJ	T-JI	S-IG	T-G	S-GE	T-EFJ
Tempo	0:06	0:50	0:10	0:40	0:04	0:23	0:07	0:35	0:22	0:35	0:04	0:30

Figura 7.4 – Dados de entrada em formato de sequenciamento.

Com intuito de aproximar uma representação cromossômica das características dos dados, a Figura 7.5 retrata uma ilustração a essa analogia do cromossomo desenvolvido no algoritmo. Representação essa que exhibe as seguintes informações: a letra “S” dos quadros em azul significa que há necessidade de realização de *setup* e após o hífen (–) é apresentado o tipo de *setup* a ser realizado, ou seja, o tipo de transição das tarefas a serem executadas. Exemplos de *setup* que podem ser visualizados na Figura 7.3: INICIAL, FE, GE e etc, sendo então GE uma configuração de transição da tarefa G para E.

Cromossomo do sequenciamento de tarefas a serem executadas no Torno											
S-INICIAL	2/CG8/JF	S-FE	4/CG9/EG	S-GE	2/CG10/E	S-EJ	1/CG11/JI	S-IG	1/CG12/G	S-GE	1/CG13/EFJ

Figura 7.5 – Exemplo de cromossomo com distribuição aleatória de tarefas para o Torno.

Nos quadros amarelos os números representam a quantidade (exemplo: 2, 4 e 1) a ser produzida, após a separação pela barra (/) se têm o código das OPs (exemplos: CG8, CG9 e CG10) e, por último, separados novamente por barra, existe a representação das tarefas a serem executadas (exemplos: JF, EG e E) como

determinadas pelas OPs, tal qual são necessárias para fabricar os produtos (peças das máquinas a serem processadas) na máquina Torno A (Código 5 na Figura 2.8).

Como visto na Figura 7.5, uma percepção cromossômica do sequenciamento da produção foi demonstrada. No entanto, nota-se que essa distribuição foi realizada de maneira inadequada no ponto de vista ótimo. Isto porque não foram consideradas as semelhanças entre as tarefas e por isso, o que demanda de diversos tempos de configuração. Também até esse momento não foram apresentados todos os dados relativos às OPs.

Desta forma, uma sugestão do AG pode ser desenvolvida e usada para tratar a capacidade de produzir um sequenciamento entre itens semelhantes, afim de reduzir características transitórias, isto é, evitar tempos de *setup*. Importante observar que existem semelhanças não aproveitadas nesse sequenciamento que promovem repetições nas configurações.

Note-se que, somente o começo da representação do cromossomo é apresentado na Figura 7.5, onde é considerada apenas uma máquina do sistema de produção. Continuando com o entendimento da representação, a Figura 7.6 mostra um cromossomo de sequenciamento de tarefas um pouco mais otimizado.

Cromossomo do sequenciamento de tarefas a serem executadas no Torno após algumas mutações de posição											
S-INICIAL	2/CG10/E	NÃO	4/CG9/EG	NÃO	1/CG12/G	S-GE	1/CG13/EFJ	NÃO	2/CG8/JF	S-FJ	1/CG11/JI

Figura 7.6 – Cromossomo com distribuição de tarefas após mutações de posição.

Em analogia para se obter esta melhoria foi utilizado mutações por troca de posições. Nota-se que esse recurso possibilitou melhorar o sequenciamento da produção através da semelhança entre as tarefas. Observa-se ainda nesta Figura que somente são necessárias duas paradas para *setup* mais a configuração inicial, diferentemente na Figura 7.5 seriam necessárias cinco paradas para configuração.

O Algoritmo apresentado ainda deve verificar outras condições a serem satisfeitas para determinar a melhor solução para o problema, notoriamente redução de tempos gastos com *setup*. É apenas uma das verificações a serem satisfeitas, condições essas conhecidas como objetivos da produção.

Na Figura 7.7 poderá ser visto uma representação cromossômica com duas máquinas do sistema produtivo, caso esse que representa com mais ênfase o estudo de caso, pois, neste momento, torna-se mais interessante conhecer os aspectos que tangem o sistema produtivo, isto é, o que realmente deve ser considerado dentro do algoritmo desenvolvido, para que possam ser geradas soluções de boa qualidade.

7.2 – Função de Avaliação

Neste problema, para que os cromossomos gerados sejam considerados válidos, os mesmos devem respeitar a seguinte condição de restrição: obrigatoriamente a execução deve condicionar as prioridades das sequências contidas nas OPs.

Essa regra de restrição é explicada agora: quando uma OP possuir prioridade (precedência) com valor agregado igual a '1', a mesma deverá ser sequenciada de modo que seja executada primeiramente no Torno A e depois na outra máquina do estudo, a Mandrilhadora. Caso possua o valor igual a '2', a regra é alterada primeiramente para a execução na Mandrilhadora e posterior no Torno.

Existe o caso onde as OPs não possuem prioridade, essas possuem valor de precedência igual a '0' condicionada a esse parâmetro. Para esses tipos de OPs, não existe a restrição de prioridade, tornando-se livre, ou seja, tanto é possível processar a ordem na Mandrilhadora quanto no Torno primeiramente.

Finalmente, existem os dois últimos casos que indicam que as OPs só serão processadas em uma das máquinas. Para o Torno o valor é '3' e para a Mandrilhadora o valor é '4'.

Um exemplo de cromossomo que segue a regra de restrição da função de avaliação: { A1 – B2 – C0 – D1 – E3 } <> { A1 – B2 – C0 – D1 – F4 }. Neste exemplo as letras representam um resumo de características das OPs e os números o tipo de dependência (restrição de precedência) da OP. A Figura 7.7 ilustra o cromossomo de sequenciamento considerado válido, dos dados que foram expostos nesse parágrafo, e a Figura 7.8 apresenta outro cromossomo com os mesmos dados de entrada, porém, com um sequenciamento considerado inválido no algoritmo.

A1	B2	C0	D1	E3	<>	A1	B2	C0	D1	F4
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Figura 7.7 – Exemplo de solução válida.

C0	A1	B2	D1	E3	<>	D1	B2	A1	C0	F4
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Figura 7.8 – Exemplo de solução inválida.

A solução apresentada na Figura 7.8 é inválida, pois não é possível processar as ordens de produção nesta seqüência, pois B2 na primeira parte do cromossomo (seqüências da máquina 1 “Torno A”) possui prioridade de sequenciamento na máquina 2 (Mandrilhadora), o que indica uma execução da OP B2 na máquina 2 primeiramente. No entanto, é necessário executar a ordem D1 na máquina 2, antes da OP B2, mas a OP D1 possui a prioridade de execução na máquina 1 e a mesma está sequenciada de modo que B2 seja executado no Torno A primeiramente.

Então, neste sequenciamento equivocado, a ordem D1 só será executada na máquina 1 após a execução da ordem B2, o que provoca uma redundância e não permite a execução destas ordens de produção.

Após a geração das soluções, sempre é verificada a avaliação de cada solução, seja ela gerada válida ou inválida. Para casos onde são geradas soluções inválidas, ou seja, soluções que não respeitam a critérios restritivos, a função de avaliação determina valores absurdamente altos que a descaracterizam como possível solução satisfatória do sistema.

Soluções consideradas válidas têm suas características avaliadas de modo a representar cada um dos diversos objetivos, sendo posteriormente testadas como possíveis soluções elite, que são soluções que melhor atendem aos objetivos, ou seja, soluções que melhor satisfazem as condições desejadas pelo agente decisor.

Cada nova solução gerada será comparada com as soluções elite atuais. Isso ocorre desde a geração das soluções iniciais. Sendo assim, em qualquer geração poderá ser encontrada uma solução satisfatória, porém, como o processo dos Algoritmos Genéticos tendem a gerar indivíduos cada vez mais evoluídos, o método tenderá a encontrar soluções melhores a cada nova geração, ou então estagnar-se quando for encontrada a solução ótima para o objetivo proposto.

Como os Algoritmos Genéticos são geradores de soluções aleatórias, não é possível garantir que o método irá convergir para soluções Pareto-ótimas, entretanto como já explicado na pesquisa no capítulo 6 deste trabalho, em casos reais soluções consideradas sub-ótimas são bem aceitas e promovem resultados considerados satisfatórios. Então se pode entender que a avaliação de todas as soluções e em todos os estágios do processo evolutivo pode facilitar a descoberta de uma solução ótima ou próxima da ótima (sub-ótima, satisfatória).

Abaixo são descritas as funções de avaliação para cada um dos objetivos propostos na pesquisa:

- a) Função de avaliação de *setup*;
- b) Função de avaliação do maior tempo de produção (caminho crítico ou *makespan*);
- c) Função de avaliação dos custos de produção;
- d) Função de avaliação dos custos de atraso;
- e) Função de avaliação da função ponderada Multiobjetivo.

7.3 – Geração dos Cromossomos Iniciais

Os cromossomos iniciais são gerados aleatoriamente a partir da quantidade de OPs do sistema, a quantidade de cromossomos iniciais será definida pelo agente decisor. Dentro do número possível de combinações para OPs em uma máquina do sistema, o agente decisor será limitado a escolher um valor mínimo de 4 a um valor máximo de 400 cromossomos, para formar a população inicial. A determinação desses valores será entendida mais a frente no capítulo 8 deste documento, onde são apresentados os testes e resultados obtidos.

O problema possui grande quantidade de combinações possíveis, sendo que se o sistema possuir 4 OPs o número de combinações é $4!$ (24), se possuir 10 OPs, o número de cromossomos gerados será de $10!$ (3.628.800). Isso levando em consideração somente uma máquina. Para tanto, como o sistema possui duas máquinas que devem ser sequenciadas, esse número de possíveis soluções aumenta muito.

Considerando o número de soluções totais para um sistema com 10 OPs e 2 máquinas, ambas com as mesmas OPs, a formulação do total de combinações possíveis pode ser expressa por $[\text{n}^\circ \text{ de OPs}]^{\text{N}^\circ \text{ de máquinas}} = [10!]^2 =$

13.168.189.440.000, sendo que nem todas essas soluções são válidas se existir prioridade de sequenciamento em alguma ordem de produção.

Portanto, caso não exista nenhuma prioridade de execução das OPs em um sequenciamento com 10 OPs, seria necessário testar 13.168.189.440.000 soluções, para encontrar a solução ótima. Claro que isso seria necessário se não for utilizado uma técnica que encurte esse caminho. Caso exista prioridade, seria também necessário testar todas, seja para verificar se a solução é válida ou não.

Então o número de soluções da máquina 1 é multiplicado pelo número de soluções da máquina 2, ou seja, 4 OPs para máquina 1 e 6 OPs para máquina 2 teriam “ $4! \times 6! = 17.280$ ” combinações possíveis. Note-se que a utilização de pequenas quantidades de OPs, pode gerar problemas bastante complexos. Fato que incentiva o uso de uma heurística que reduz a quantidade de soluções testadas e promovem soluções sub-ótimas ou satisfatórias ao problema.

Para entender o problema considere a seguinte sequência de produção: { 1/Ok79/KGH – 4/Pw72/KHGF – 6/Lk86/HJFK } <> { 1/Ok79/KGH – 4/Pw72/KHGF – 6/Lk86/HJFK }. Neste exemplo a primeira parte do sequenciamento é para máquina 1 (Torno A) e a segunda parte após o símbolo “<>” é apresentado o sequenciamento da máquina 2 (Mandrilhadora).

Pra facilitar o entendimento é feita a seguinte substituição { A – B – C } <> { A – B – C }. Assim tem-se A = 1/Ok79/KGH; B = 4/Pw72/KHGF; C = 6/Lk86/HJFK. Deste modo, pode ser entendida a representação dos cromossomos de maneira básica, pois nessa representação dos cromossomos não são apresentadas as informações relativas a tempo de *setup* e nem a prioridade na execução das tarefas. A Tabela 7.1 apresenta os cromossomos iniciais gerados a partir deste exemplo.

Tabela 7.1 – Exemplo de cromossomos para 3 Ops sem *Setup* e restrição de precedência.

A	B	C	<>	A	B	C
A	C	B	<>	A	C	B
B	A	C	<>	B	A	C
B	C	A	<>	B	C	A
C	A	B	<>	C	A	B
C	B	A	<>	C	B	A

Note-se que todas as soluções são válidas, pois não existe ainda uma restrição de precedência. Se for considerado que a primeira parte do cromossomo representa as OPs que serão sequenciadas no Torno A e a segunda representa as OPs para Mandrilhadora, poderá ser utilizada qualquer uma dessas soluções.

Considerando que haja prioridade ou não em qualquer ordem e em qualquer equipamento. Isto ocorre porque as OPs estão na mesma posição em ambas as máquinas. Exemplo: suponha que as ordens C possui prioridade “1”, a ordem A possui prioridade “2” e a ordem B não possui prioridade. Veja que todas essas soluções geradas são válidas segundo a restrição apresentada.

Para novas gerações, serão selecionados os melhores cromossomos obtidos pela função de aptidão. A quantidade de cromossomos selecionados como pais será sempre três, sendo que a escolha de cada pai passa por um torneio entre os três pais selecionados, onde a solução que tiver a melhor aptidão para gerar uma solução válida será selecionada segundo critérios do torneio e baseado nos pesos da função de aptidão definidos pelo agente decisor.

7.4 – Cruzamento e Geração de Descendentes

Após a seleção dos pais são aplicados os cruzamentos desde que a condição de cruzamento seja satisfeita. O cruzamento é realizado entre dois pais vencedores do torneio, gerando dois novos filhos, através de cruzamento de apenas um ponto, como pode ser visto a frente na Figura 7.9.

Na Figura 7.9 é representado o cruzamento entre os pais selecionados na função Torneio, se houver autorização do cruzamento os pais serão cruzados, deste modo apresentado na Figura.

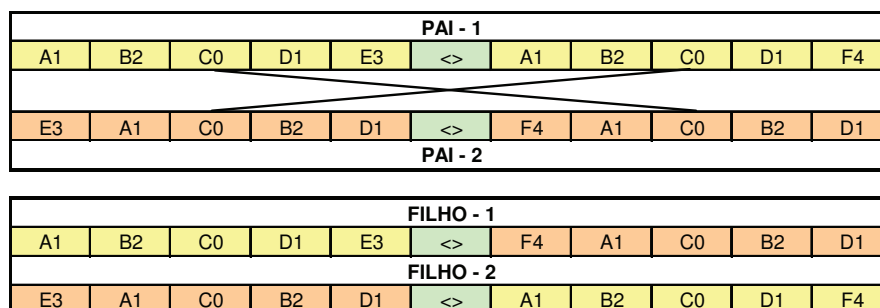


Figura 7.9 – Exemplo de filhos gerados por cruzamento de um ponto.

Com a geração dos filhos, verifica-se a possibilidade de realização de mutação nesses novos descendentes gerados, caso ocorra os cromossomos que representam os filhos, são alterados por trocas diretas de posição e tem suas características avaliadas. Caso não ocorrer a mutação, os descendentes se mantêm e também são avaliados como soluções do problema. A mutação é representada de forma a melhorar o entendimento na Figura 7.11 a frente neste documento.

Todas as soluções geradas poderão corresponder a soluções elite. Sendo assim, a cada nova solução gerada, devem ser avaliadas as funções que representam sua capacidade em fornecer uma solução satisfatória, ou seja, todas as soluções são testadas e verificadas, não ficando restritas somente aos cromossomos finais.

A idéia de trabalhar com soluções elite, reflete a necessidade de não perder nenhuma solução em potencial e em qualquer momento de execução do algoritmo. Podendo, então, ser encontrada a melhor solução para qualquer uma das funções do problema desde a população inicial até a ultima geração.

O ponto de cruzamento indica a separação das máquinas, ou seja, a primeira parte do cromossomo representa o sequenciamento de ordens para o Torno A e a segunda parte o sequenciamento para a Mandrilhadora. Sendo assim, não poderá haver cruzamento em outros pontos, pois esses iriam gerar sempre soluções inválidas quando duas OPs fossem repetidas em uma parte do cromossomo.

Entende-se que a geração de soluções inválidas pelo cruzamento de mais de um ponto poderia provocar uma repetição de alguma OP no mesmo cromossomo, isto é, não respeitando uma condição básica de uma solução, uma OP não pode ser processada por mais de uma vez, e ainda faria com que outra OP não entrasse na solução, o que indicaria uma não-fabricação dessa OP, portanto soluções inválidas.

Porém, essas condições apresentadas não impedem a geração de soluções inválidas, pois a restrição de precedência poderá gerar uma inviabilidade de redundância a cada solução nova a ser criada. Para evitar essas soluções inválidas, a função de aptidão deve ser bem elaborada neste sentido. Desta forma essa função deverá promover uma redução na inviabilidade das soluções e não uma extinção delas, o que torna possível encontrar uma solução que satisfaça as condições e

restrições do problema mesmo sendo descendente de soluções consideradas inválidas.

A Figura 7.10 demonstra os filhos gerados caso não ocorra o cruzamento. Note-se que os mesmos são idênticos aos pais apresentados na Figura 7.9. Assim, se não ocorrer cruzamento, os filhos serão cópias dos pais.

FILHO - 1										
A1	B2	C0	D1	E3	<>	A1	B2	C0	D1	F4
FILHO - 2										
E3	A1	C0	B2	D1	<>	F4	A1	C0	B2	D1

Figura 7.10 – Exemplo de filhos gerados se não ocorrer cruzamento.

Na Figura 7.11 visualiza-se a troca de posições aleatórias ocorridas caso uma mutação aconteça. Neste exemplo, verifica-se que as ordens mudaram de posição, como exemplo a ordem B2 que estava na segunda posição da primeira parte do cromossomo passa a ser a quarta ordem a ser executada após a mutação, mas outras trocas podem ser visualizadas na Figura.

ANTES DA MUTAÇÃO										
A1	B2	C0	D1	E3	<>	F4	A1	C0	B2	D1
DEPOIS DA MUTAÇÃO										
A1	B2	E3	D1	C0	<>	F4	B2	C0	A1	D1

Figura 7.11 – Mutação no cromossomo.

7.5 – Função de Aptidão

A função de aptidão caracteriza-se por definir as soluções com maiores chances de gerar novas soluções válidas. Basicamente, é aplicada uma fórmula matemática que identifica qual será sua capacidade de gerar uma nova solução, que seja válida ao sistema de produção.

Os valores calculados na função de aptidão serão gerados para os pais quando comparados no torneio aplicado como método de seleção de pais. Inicialmente, são escolhidos três pais aleatoriamente no conjunto de soluções disponíveis no momento. Esses três pais disputam um torneio, onde o que tiver melhor aptidão para gerar uma solução válida é selecionado.

Uma solução inválida poderá ser cruzada com uma solução válida ou mesmo com outra inválida e gerar uma solução satisfatória. Por esse motivo, a função de aptidão é diferenciada da função de avaliação. Nada garante que duas boas soluções verificadas válidas na função de avaliação possam gerar dois filhos com tais características. Dessa forma, a função de aptidão caracteriza-se por encontrar pais com capacidade de gerar filhos válidos e que venham a convergir para boas soluções.

7.6 – Função Torneio

O Algoritmo desenvolvido permite a aplicação de um método de gerações de novos indivíduos na população (cromossomos filhos). Esse método consiste no Torneio de 3, bastante conhecido na literatura.

No método, a cada geração são selecionados três cromossomos aleatoriamente no conjunto de solução existente e o pai (cromossomo) que tiver a melhor aptidão será declarado como vencedor do Torneio e será o primeiro pai selecionado. Com a definição do primeiro pai, novamente serão selecionados aleatoriamente três novos indivíduos que irão realizar a disputa, e então será definido o segundo pai. A partir desses dois pais selecionados via Torneio de 3, serão geradas duas novas soluções, isto é, dois novos filhos.

Capítulo 8 – Testes e Resultados

“Neste capítulo serão apresentados os parâmetros, os recursos, os dados, os testes e resultados aplicados no algoritmo desenvolvido.”

Neste capítulo são descritos e apresentados os testes realizados na pesquisa, as análises e seus respectivos resultados teóricos para uma aplicação no sistema real da empresa estudada.

8.1 – Parâmetros Disponíveis

Na Tabela 8.1, disponibiliza-se informações sobre os recursos e as limitações deste estudo; nela são apresentados os parâmetros a serem utilizados nas configurações do algoritmo desenvolvido.

Tabela 8.1 – Parâmetros do Algoritmo.

Nomenclatura	Parâmetro	Valores
População	P	Pm
População inicial	PI	Randômica ou Real
Nova População	NP	Tmax
Tamanho da População	Tmax	$0 < Tmax \leq 400$
Número de Gerações	NGmax	(> 0)
Função de Aptidão	Apt (x)	
Função de Avaliação	Avl (x)	
Probabilidade de cruzamento	Cx%	$0 \leq Cx \leq 1$
Probabilidade de mutação	Mt%	$0 \leq Mt \leq 1$
Número ordens de produção	NOmax	$4 \leq NOmax \leq 100$

8.2 – Recursos de Software

Os recursos de *software* utilizados no desenvolvimento e execução dos testes do Algoritmo foram os seguintes:

Recursos de Desenvolvimento: Utilizou-se do ambiente de desenvolvimento integrado a IDE Delphi 7.0 com a linguagem ObjectPascal.

Recursos de Execução: O Algoritmo foi executado na plataforma operacional Microsoft Windows XP Professional, Versão 2002 Service Pack 3.

8.3 – Recursos de *Hardware*

Os recursos de *hardware* utilizados para executar o Algoritmo desenvolvido na pesquisa foram os seguintes:

Processador: Mobile Intel Pentium M 735, 1700 MHZ

Memória: 2 pentes DDR 3200, 512 MB.

Dispositivo de armazenamento: Ultra-ATA/100, 60 GB, 5400 RPM.

8.4 – Dados do Sistema de Produção

Cenário 1: possui 18 ordens de produção a serem escalonadas. Cenário 2: possui 29 ordens de produção a serem escalonadas. Mais informações sobre os dois cenários utilizados na pesquisa, podem ser, observadas no apêndice D deste documento.

O primeiro cenário possui um horizonte de aproximadamente uma semana de escalonamento de tarefas no ambiente produtivo, já o segundo cenário possui uma amplitude de sequenciamento de duas semanas, por esse motivo um número menor de Ops no primeiro cenário.

Também porque o segundo cenário reflete um momento em que o ambiente produtivo encontra-se com capacidade produtiva em gargalo nessas máquinas, isto é, ambiente em atraso com suas obrigações, o que indica uma real necessidade de conhecer previamente os pontos críticos e tratá-los.

8.5 – Testes

Esta seção será dividida em duas partes. Na primeira são executadas rotinas que buscam encontrar os melhores parâmetros para aferir o algoritmo e comparar

com o cenário real apresentado no capítulo anterior, afim de testar e definir características para outros cenários encontrados no sistema real.

Na segunda parte se aplica os melhores parâmetros encontrados no cenário de testes e ainda verifica se outros parâmetros poderiam promover melhores soluções para esse segundo cenário de OPs. Posteriormente, é apresentado os seus resultados.

8.5.1 – Testes para Definição de Parâmetros

A Tabela 8.2 apresenta os testes direcionados para definição dos primeiros parâmetros do Algoritmo. O desejo destes testes está relacionado à definição da probabilidade de cruzamento. Para isto foi fixada a população inicial em 50 cromossomos, bem como o número de gerações e a probabilidade de cruzamento, variando somente os valores relativos ao cruzamento, sendo que esta variação decorreu de 95% até 80%, que são medidas consideradas na literatura atual.

Tabela 8.2 – Testes para definição da probabilidade de cruzamento.

Tam. Pop	Gerações	Prob. Cruz.	Prob. Mutação	MultiObjetivo	Tempo Setup	Caminho crítico	Custo Total	Custo Atraso	Tempo
50	20	95%	5%	4853,271	248,4	3555,4	12415,57	1155,12	13,1246
50	20	90%	5%	4911,335	259,8	3552,4	12535,45	1264,48	17,571
50	20	85%	5%	4892,011	259,2	3552,4	12507,53	1127,2	15,7866
50	20	80%	5%	4922,715	261,4	3556,6	12545,05	1267,6	13,9458

Os dados expressos na Tabela refletem a media de cinco testes aplicados no algoritmo, sendo analisados os valores de cada função objetivo do problema, obtida nos testes. Deve-se destacar que a população inicial expressa em todos os testes é a mesma, sendo então medida a eficiência dos resultados alterando somente o parâmetro de probabilidade de cruzamento.

Nota-se na Tabela o destaque para as melhores soluções e tempo de execução do algoritmo. Por sua vez, pode-se destacar a maior eficiência nas soluções com 95% no valor deste parâmetro. Por hora entende-se que esta eficiência pode ser generalizada para os demais problemas que serão demonstrados.

Com a definição do parâmetro de cruzamento, desejou-se encontrar a probabilidade de mutação eficiente. A Tabela 8.3 apresenta os valores encontrados

nos testes. Vale lembrar que todos os objetivos do problema refletem a minimização de seus valores como critério de otimização.

Tabela 8.3 – Testes para definição da probabilidade de mutação.

Tam. Pop	Gerações	Prob. Cruz.	Prob. Mutação	MultiObjetivo	Tempo Setup	Caminho crítico	Custo Total	Custo Atraso	Tempo
50	20	95%	5%	4853,271	248,4	3555,4	12415,57	1155,12	13,1246
50	20	95%	15%	4917,579	268	3560,4	12545,05	1108,72	13,6976
50	20	95%	25%	4872,571	258	3552,4	12429,97	1039,28	14,0904
50	20	95%	25%	4872,571	258	3552,4	12429,97	1039,28	14,0904
50	20	95%	35%	4835,171	244	3552,4	12363,45	831,28	14,731
50	20	95%	45%	4738,407	242	3526,2	12059,45	525,92	15,388
50	20	95%	55%	4814,591	251,2	3544,8	12319,21	823,92	15,9554

Avaliando os dados obtidos nesta Tabela, percebe-se que o algoritmo demonstrou eficiência em uma probabilidade de mutação um tanto elevada ao ser comparada às descritas na literatura de algoritmos genéticos. Porém, vale ressaltar que na pesquisa de Martins (2000) a menor média de *makespan* alcançada nos testes foi com valor de 0,4 (40%) para o parâmetro de mutação.

Como análise inicial acreditou-se que este valor poderia ser reduzido se a população fosse relativamente maior, caso que será apresentado à frente, com testes e resultados obtidos. Ainda é possível destacar nesse momento que o algoritmo Tornou-se mais eficiente se aplicado um valor que determinasse um comportamento mais aleatório, tendo em vista esse parâmetro um pouco elevado em relação a pesquisas vastamente conhecidas.

A limitação dos valores testados para os parâmetros até agora apresentados segue uma linha de testes preliminares que aqui estão ocultos. Nestes testes, percebeu-se que os demais valores aplicados encontravam soluções de representação bastante sofríveis do ponto de vista ótimo, por este motivo não entraram nos testes oficiais do problema.

Para efeito de comprovação da evolução das soluções com passar das gerações, foram realizados novos testes mantendo a mesma população inicial e deixando evoluir os cromossomos por mais gerações.

Na Tabela 8.4 são tabulados os dados relativos a média desses testes, onde é passível de observação que as melhores soluções ou mesmo a segunda melhor (destacadas em amarelo) foram encontradas nos testes que possuíam o maior número de gerações.

Tabela 8.4 – Testes para verificação da evolução das soluções.

Tam. Pop	Gerações	Prob. Cruz.	Prob. Mutação	MultiObjetivo	Tempo Setup	Caminho crítico	Custo Total	Custo Atraso	Tempo
50	20	95%	45%	4738,407	242	3526,2	12059,45	525,92	15,388
50	60	95%	45%	4730,131	240,4	3526,8	12046,77	617,76	43,4366
50	100	95%	45%	4702,827	205,2	3515,8	11975,09	467,04	70,944
50	200	95%	45%	4675,471	228,8	3528,2	11880,17	403,44	141,3346
50	400	95%	45%	4633,143	224,4	3512	11795,21	435,04	282,6746

Esse feito indica que o algoritmo mesmo com um comportamento inicialmente considerado aleatório está evoluindo em seus objetivos com as novas gerações, isto é, tende a melhorar os indivíduos gerados a cada cruzamento. Porém, como a pesquisa retrata soluções elite, às vezes alguns objetivos podem ser alcançados prematuramente e se estagnar nas demais gerações. Ou seja, pode ocorrer do mesmo ser encontrado até na população inicial. Observa-se nesta Tabela que, quanto maior o número de gerações, maior o tempo de processamento do algoritmo.

Para verificar a influência no tamanho da população em relação aos resultados obtidos, foram realizados testes com tamanhos distintos e comparados em duas situações: a primeira, com número de gerações igual a 20 e, a segunda, com número de gerações iguais a 100. Em ambos os testes o tempo de execução do algoritmo está livre, isto é, não foi aplicada nenhuma restrição ao mesmo. A Tabela 8.5 são descritos os dados encontrados.

Tabela 8.5 – Testes para verificação da influencia do tamanho da população.

Tam. Pop	Gerações	Prob. Cruz.	Prob. Mutação	MultiObjetivo	Tempo Setup	Caminho crítico	Custo Total	Custo Atraso	Tempo
50	20	95%	45%	4738,407	242	3526,2	12059,45	525,92	15,388
75	20	95%	45%	4799,495	258,8	3560,4	12199,29	708,72	22,2222
100	20	95%	45%	4692,751	222	3533,6	12000,37	665,2	29,7148
200	20	95%	45%	4696,195	221,4	3536,4	11937,97	490,08	68,012
400	20	95%	45%	4741,523	232,2	3521,2	12059,47	502,8	142,5674
Tam. Pop	Gerações	Prob. Cruz.	Prob. Mutação	MultiObjetivo	Tempo Setup	Caminho crítico	Custo Total	Custo Atraso	Tempo
50	100	95%	45%	4702,827	205,2	3515,8	11975,09	467,04	70,944
75	100	95%	45%	4753,963	228	3537,6	12105,91	605,12	104,8528
100	100	95%	45%	4703,851	218,4	3522,2	11945,33	498,24	143,2804
200	100	95%	45%	4623,546	212	3513,6	11720,21	316,88	328,3782
400	100	95%	45%	4646,8406	208,8	3510,2	11748,05	287,44	708,2684

Para garantir uma análise adequada dos dados, foi utilizada a mesma população inicial em todos os testes, de modo que todas as populações menores que 400 correspondem a parte dessa população, mais precisamente as primeiras soluções. Isto é, em uma população de tamanho 100, foram utilizadas as 100 primeiras soluções iniciais do problema, assim esta mesma regra foi aplicada nos demais valores.

Em destaque (verde) são apresentados os melhores valores encontrados, em amarelo os segundos melhores correspondentes. Uma análise preliminar indica que em um número menos elevado de gerações, as populações de 100 e 200 indivíduos promoveram os melhores resultados, seguida da população de 400. Para um valor de 100 gerações se observa que as melhores soluções foram encontradas nas maiores populações, o que indica que a evolução do algoritmo Tornou-se melhor neste sentido.

Com intuito de minimizar discussões a respeito do alto valor de probabilidade de mutação, novos testes foram aplicados, testes esses necessários, pois poderia creditar-se que a generalização não seria aplicada com sucesso em populações relativamente maiores. A Tabela 8.6 retrata esses novos testes.

Tabela 8.6 – Testes com tamanho da população e probabilidade de mutação.

Tam. Pop	Tempo(s)	Prob. Cruz.	Prob. Mutação	MultiObjetivo	Tempo Setup	Caminho crítico	Custo Total	Custo Atraso	Gerações
200	30	95%	5%	4941,003	249,8	3569,4	12579,61	965,52	12
200	30	95%	15%	4896,679	231,8	3561,4	12564,83	1024,96	11
200	30	95%	25%	4886,746	244,6	3559,4	12522,92	1005,04	10,2
200	30	95%	35%	4811,6888	249,4	3548,2	12274,02	744,12	9,2
200	30	95%	45%	4833,439	241	3562,4	12395,93	823,44	9
200	30	95%	55%	4830,614	243,2	3549,2	12349,69	803,04	8,8
Tam. Pop	Tempo(s)	Prob. Cruz.	Prob. Mutação	MultiObjetivo	Tempo Setup	Caminho crítico	Custo Total	Custo Atraso	Gerações
400	30	95%	5%	4699,655	240,6	3528,6	11990,45	612,16	5,8
400	30	95%	15%	4692,977	234,6	3528,4	11939,99	539,92	5,4
400	30	95%	25%	4687,615	230,2	3528,6	11932,05	532,08	5
400	30	95%	35%	4729,197	231	3532	12044,49	639,52	5
400	30	95%	45%	4710,649	236,8	3536	12029,43	647,28	4
400	30	95%	55%	4821,047	237,4	3527	12272,83	667,84	4

A verificação dos dados da Tabela refletiu essa expectativa, onde o tamanho da população influenciou na eficiência do algoritmo em relação a probabilidade de mutação. No entanto, os valores caíram relativamente, porém ainda são considerados altos. Contudo, essa nova bateria de testes pode demonstrar que a pequena população tem a necessidade de torna-se aleatória para promover uma melhor abrangência no universo de soluções do problema.

Em casos onde a população é mais elevada, o abrangência inicial do universo de soluções já pode ser satisfatória, havendo então somente a necessidade de conversão para soluções ótimas através dos cruzamentos. Nota-se que neste teste a limitação para verificar a eficiência dos parâmetros no algoritmo, foi aplicada no tempo de execução, onde se desejava verificar quais parâmetros iriam convergir mais rapidamente para as melhores soluções.

Em face do exposto, desejou-se aplicar os últimos testes de definição de parâmetros, antes de realizar os testes finais e apresentar os resultados do primeiro cenário de produção analisado. A Tabela 8.7 representa os valores destes testes.

Tabela 8.7 – Testes para definir os melhores parâmetros do primeiro cenário.

Tam. Pop	Tempo(s)	Prob. Cruz.	Prob. Mutação	MultiObjetivo	Tempo Setup	Caminho crítico	Custo Total	Custo Atraso	Gerações
100	60	95%	45%	4750,895	226	3534,2	12170,05	749,92	35,4
200	60	95%	35%	4699,575	210,6	3517,8	12019,81	514,48	19
400	60	95%	25%	4734,409	205,6	3515,8	12071,13	582,64	10

Os dados computados nessa Tabela refletiram uma pequena superioridade nos objetivos considerados mais importantes do problema, para a população de 200 cromossomos e 95% de probabilidade de cruzamento e 35% de mutação. A observação revela que as populações maiores refletiram os melhores resultados com destaque para o valor 200. Sendo assim, foi determinado que nesse cenário os testes finais deveriam possuir esses valores determinados. Novamente o tempo foi fixado para verificar a eficiência em que as soluções iriam convergir.

Com mesmo intuito foram realizados testes no segundo cenário de produção para definição dos melhores parâmetros para execução do algoritmo. Também nesse caso, mesmo possuindo um número maior de ordens de produção, resultou em uma população de 200, como melhor parâmetro em termos de eficiência na execução do algoritmo. Por possuir um número maior de OPs, foi determinado também um tempo maior na execução dos testes, no caso 120 segundos.

Tabela 8.8 – Testes para definir os melhores parâmetros do segundo cenário.

Tam. Pop	Tempo(s)	Prob. Cruz.	Prob. Mutação	MultiObjetivo	Tempo Setup	Caminho crítico	Custo Total	Custo Atraso	Gerações
100	120	95%	45%	8348,74	478,60	5265,20	22113,39	4024,59	51,60
200	120	95%	35%	8144,56	449,20	5264,40	21487,32	3892,97	27,80
400	120	95%	25%	8320,55	501,60	5264,80	22229,34	4198,96	13,60

8.5.2 – Testes Finais

De posse dos valores dos parâmetros, foram aplicados os testes nos dois cenários conhecidos do problema: o primeiro, será comparado com as anotações decorridas da Figura 7.1 apresentada neste documento, o segundo, comparado com dados da Figura 2.13, que ilustra informações fundamentais relativas a esse cenário.

Para esses testes finais foram determinadas as seguintes considerações em relação aos parâmetros do Algoritmo. No primeiro cenário, foi utilizado 600

segundos como critério de parada do algoritmo relativo a tempo de execução, tempo esse considerado aceitável para o número de OPs a serem sequenciadas.

Para o segundo cenário, o tempo foi elevado para 1200 segundos, isto se deve ao fato desse cenário possuir um número maior de OPs a serem escalonadas e também por acreditar que esse é um tempo considerado satisfatório para outras aplicações futuras.

Na Tabela 8.9, os dados dos testes finais do cenário 1 são apresentados. A Tabela 8.10 apresenta os testes finais para o segundo cenário de produção exposto na pesquisa. Nas Tabelas os valores em amarelo representam os cinco testes realizados e os destacados em verde representam a média desses valores.

Tabela 8.9 – Testes finais do primeiro cenário.

Tamanho Pop	Tempo(s)	Prob. Cruz.	Prob. Mutação	MultiObjetivo	Tempo Setup	Caminho crítico	Custo Total	Custo Atraso	Gerações
200	600	95%	35%	4528,535	217	3514	11418,45	63,6	199
200	600	95%	35%	4509,035	210	3505	11372,45	107,2	199
200	600	95%	35%	4509,335	221	3511	11406,45	80,8	198
200	600	95%	35%	4515,235	188	3504	11416,45	119,6	195
200	600	95%	35%	4524,255	217	3515	11454,85	121,6	198
200	600	95%	35%	4517,279	210,6	3509,8	11413,73	98,56	197,8

Tabela 8.10 – Testes finais do segundo cenário.

Tamanho Pop	Tempo(s)	Prob. Cruz.	Prob. Mutação	MultiObjetivo	Tempo Setup	Caminho crítico	Custo Total	Custo Atraso	Gerações
200	1200	95%	35%	7191,77	445	5225	17949,15	605,4	279
200	1200	95%	35%	7073,465	416	5270	17957,45	520,3	288
200	1200	95%	35%	7016,71	430	5267	17853,7	545,4	286
200	1200	95%	35%	7029,11	411	5269	17892,7	598,15	293
200	1200	95%	35%	7069,835	457	5219	18074,45	716,25	286
200	1200	95%	35%	7076,178	431,8	5250	17945,49	597,1	286,4

8.6 – Resultados

A abordagem da pesquisa proporcionou resultados considerados satisfatórios estimando uma futura aplicação real, esses resultados serão apresentados e explicados. Na Tabela 8.11 são apresentadas às comparações entre os resultados encontrados e o cenário de produção real, cenário esse, com sequenciamento desenvolvido de maneira manual.

Tabela 8.11 – Comparações dos resultados do cenário 1.

Tamanho Pop	Tempo(s)	Prob. Cruz.	Prob. Mutação	MultiObjetivo	Tempo Setup	Caminho crítico	Custo Total	Custo Atraso
200	600	95%	35%	4517,279	210,6	3509,8	11413,73	98,56
Melhores cromossomos encontrados nos testes finais:				4509,035	188	3504	11372,45	63,6
Melhores cromossomos encontrados em todos os testes:				4509,035	188	3500	11372,45	63,6
Valores reais:				4730,635	328	3570	11760,25	329,2
Diferença entre media dos testes finais com valores reais:				213,356	117,4	60,2	346,52	230,64
Dif. entre media dos testes finais com valores reais (%):				4,51%	35,79%	1,69%	2,95%	70,06%
Dif. entre o melhor crom. dos testes com valores reais (%):				4,68%	42,68%	1,85%	3,30%	80,68%

É possível abstrair dessa Tabela a diferença entre os resultados obtidos pela ferramenta e o sequenciamento desenvolvido manualmente. Para o objetivo de mínimo tempo de *Setup*, foi encontrado na média um sequenciamento 35,79% mais eficiente. No caminho crítico porém, essa melhoria não foi tão substancial, o que provocou uma equiparação 1,69% mais eficaz.

O mesmo ocorreu na eficiência dos custos de produção, onde o sequenciamento médio relativo ao Custo Total apresentado pelo algoritmo foi somente 2,95% melhor. Já no objetivo de Custo com Atraso a eficiência atingiu um bom patamar médio, isto é, 70,06% melhor. Na função ponderada Multiobjetivo a eficiência foi de 4,51% superior.

Analisando inicialmente poderá parecer que o Algoritmo promoveu uma baixa eficiência geral, devida a grande importância dos objetivos de Custo Total e Caminho Crítico, porém, um estudo mais amplo desse cenário ficou evidente que não poderia haver uma melhora substancial nesses objetivos.

O cenário apresentado teve uma característica de simples sequenciamento, o que não promoveu tempos de espera, e tempos para *Setup* relativamente baixos. Está verificação é passível de ser entendida devido à semelhança entre as tarefas.

Assim dificilmente seria possível melhorar a eficiência no tempo de produção, pois ela seria somente relacionada à melhoria na eficiência do tempo de *Setup*. Sendo que nesse caso, pouco influenciou no tempo total, isto é, a representação desse tempo de configuração das máquinas, foi baixa em comparação com Caminho Crítico.

De mesmo modo ocorre no custo de produção, a melhoria é um pouco mais significativa, essa devido ao custo de produção ser associado principalmente ao tempo de produção das Ops, pelo mesmo motivo, também não foi possível melhorar substancialmente. Para a solução Multiobjetivo também se conota uma influência maior nesses objetivos, o que provocou um resultado melhor, porém, não tão elevado como se esperava.

Entretanto, em todos os objetivos foi possível verificar uma melhora, isto é, conseguiu que o Algoritmo mesmo em um problema simples de sequenciar fosse

mais eficiente e esse era o objetivo principal da pesquisa, pois, como o sistema atual não prove de ferramenta que otimize o sequenciamento, a comparação deveria ser realizada em problema de fácil sequenciamento manual, para que pudesse ser equiparada a eficiência da técnica desenvolvida.

Nos apêndices dessa pesquisa é possível observar os melhores cromossomos encontrados nos testes computacionais e também todos os dados coletados dos testes realizados. Nos melhores cromossomos ficou evidente que os objetivos relacionados a custos estão intimamente interligados, o que indicou que quando a melhor solução relativa ao custo total é encontrada, ela geralmente está associada a melhor solução relativa aos custos de atraso. Nota-se ainda que na função Multiobjetivo foram utilizados pesos elevados para esses custos, o que proporcionou encontrar também uma ligação direta nesses cromossomos.

No cenário 2 estudado, foram consideradas mais informações reais sobre o sistema, no primeiro os custos relacionados a atraso foram abordados de maneira igualitária entre as OPs, já nesse segundo exemplo esses valores foram alterados em relação a real necessidade de entrega dos produtos, esses dados podem ser observado na Figura 2.13, que apresentou o sequenciamento do segundo cenário da primeira máquina (Torno A).

Tabela 8.12 – Comparações dos resultados do cenário 2.

Tamanho Pop	Tempo(s)	Prob. Cruz.	Prob. Mutação	MultiObjetivo	Tempo Setup	Caminho crítico	Custo Total	Custo Atraso
200	1200	95%	35%	7076,178	431,8	5250	17945,49	597,1
Melhores cromossomos encontrados em todos os testes:				7016,71	411	5219	17853,70	520,30
Valores reais:				8301,055	733	5374	19484,1	2567,75
Diferença entre media dos testes finais com valores reais:				1224,877	301,2	124	1538,61	1970,65
Dif. entre media dos testes finais com valores reais (%):				14,76%	41,09%	2,31%	7,90%	76,75%
Dif. entre o melhor crom. dos testes com valores reais (%):				15,47%	43,93%	2,88%	8,37%	79,74%

A eficiência média dos resultados obtidos no segundo cenário Tornou-se maior em todos os objetivos, evidentemente devido ao aumento na complexidade do mesmo, onde um número maior de OPs fora sequenciado e também pelas diferenciações entre as informações sobre custos relativos a atraso.

Novamente a melhor eficiência no sequenciamento do Algoritmo foi objetivo de Custo com Atraso, onde seu resultado proporcionou uma melhora média de 76,75%. Novamente a eficiência no resultado relativo ao objetivo de Tempo de *Setup* foi muito satisfatória, sendo 41,09% melhor na média. Ocorreram duas

melhorias altamente eficientes, nos objetivos de Custo Total e na função ponderada entre todos os objetivos, a melhoria média foi de 7,90% e 14,76% respectivamente.

No entanto, o objetivo de Caminho Crítico foi novamente o que promoveu a menor eficiência sendo neste segundo cenário uma média de 2,31%. Com tudo, evidenciou de novo que todos os objetivos foram alcançados satisfatoriamente, ou seja, houve melhoria em todos, sendo então que, o Algoritmo desenvolvido cumpriu a missão de promover melhoria no sistema de produção atual.

Também observando as duas Tabelas finais é possível notar que os melhores cromossomos encontrados nos testes logicamente são melhores que a média, o que indica que uma melhoria no Algoritmo poderá promover resultados substancialmente mais eficientes no futuro. Cromossomos esses que podem ser observados nos apêndices deste documento.

Capítulo 9 – Conclusões e Trabalhos Futuros

“Neste capítulo serão apresentadas as conclusões sobre o trabalho realizado e sugestões para futuras pesquisas no tema.”

9.1 – Conclusões

O desenvolvimento de um Algoritmo Genético foi bastante enriquecedor a pesquisa de aplicação prática de conceitos acadêmicos. Logo, foi possível observar fatos que são de extrema importância dentro desse tipo de técnica, onde é possível identificar dificuldades e possíveis aplicações vantajosas desse tipo de abordagem no tratamento de problemas de sequenciamento.

A pesquisa se findou com característica acadêmica, devido à abordagem estar relacionada diretamente ao desenvolvimento de um Algoritmo Genético aplicado em um estudo de caso e não para o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para ser comercializada.

Com base em todos os testes realizados e resultados obtidos, a pesquisa retornou soluções satisfatórias em tempo computacional relativamente baixo, o que indica um sucesso preliminar do trabalho, sendo assim, alcançado o objetivo da pesquisa.

No entanto para uma aplicação real do algoritmo, serão necessários ajustes na *interface* da ferramenta, seja na entrada de dados e no retorno das informações para o usuário, isso se tornará necessário ao ponto que uma visualização mais prática, isto é, menos conceitual que é necessária em um ambiente produtivo e também pelo apelo comercial, que exigem ferramentas de boa usabilidade.

Os cenários apresentados foram considerados bem sequenciados de acordo com cada objetivo, sendo de fundamental importância em problemas com múltiplos objetivos a serem alcançados uma boa análise do agente decisor, isto é, o agente é responsável pela decisão final de qual objetivo é mais importante no momento, ou seja, responsável pela escolha da melhor solução entre as apresentadas.

9.2 – Trabalhos Futuros

Como pesquisa futura, é inerente a vontade de abordar problemas cada vez mais íntimos a um sistema real, onde outras muitas variáveis do sistema deverão ser estudadas e abordadas, logo aumentando a complexidade computacional e de resolução do algoritmo.

Acredita-se que atualmente poucos supercomputadores seriam capazes de retornar bons resultados em uma abordagem mais ampla de casos reais, no entanto pesquisas que visam reduzir essa complexidade são bem vindas a serem estudadas, pois, o tempo fará com que as tecnologias sejam capazes de resolver problemas hoje considerados intratáveis computacionalmente.

Como o estudo visou desenvolver uma técnica de otimização do sequenciamento da produção e não uma ferramenta comercial, entende-se como uma aplicação de nível satisfatória, pois foi possível aplicar dados reais e obter resultados que muito serão úteis para construção efetiva de um mecanismo de auxílio nas tomadas decisórias.

Então pesquisar melhor eficiência das técnicas e contar futuramente com computadores cada vez melhores, fará com que pesquisas hoje consideradas impossíveis, sejam logo aproveitadas em ambientes produtivos.

Aplicações de problemas maiores, isto é, com número maior de Ordens de Produção e um horizonte de tempo para o sequenciamento poderão ser boas abordagens de outros estudos, onde uma visão mais abrangente do sistema seria possível, mesmo em consideração ao tratamento das máquinas em gargalo.

Ainda é importante pensar em uma pesquisa que poderá ser repensada a função de aptidão das soluções, afim de reduzir a aleatoriedade do algoritmo e facilitar a convergência do mesmo. Também é interessante promover na *interface* da ferramenta alguma possibilidade do agente decisor aplicar pesos ou mesmo valores que possam influenciar nesse aspecto, tornando assim a ferramenta cada vez mais interativa com usuário.

Logo, uma pesquisa voltada para o conhecimento mais aprofundado das características do sistema tornará necessária e poderão ser encontrados resultados

ainda melhores que os abordados neste documento, também é imprescindível uma participação maior do agente decisor pois em cenário não tratadas previamente poderá ser dele a melhor adequação da ferramenta para resolução do problema. Para isso a experiência no uso do mecanismo se fará fundamental.

Referências

ADAN JR, E. E. e SWAMIDASS P. M. Assessing Operations Management from a strategic perspective. **Journal of Management**, v. 15, n.2, p. 81-203, 1989.

ARROYO, J. E. C. e RIBEIRO, R. L. P. Algoritmo Genético para o problema de escalonamento de tarefas em máquinas paralelas com múltiplos objetivos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 36, 2004, São João Del-Rei-MG. **Anais... SOBRAPO**, 2004. p. 1546-1557.

BARCO, C. F. e VILLELA, F. B. Análise de sistemas programação e controle da produção. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28, 2008, Rio de Janeiro-RJ, **Anais... ABEPRO**, 2008, p. 1-7.

BARROS, J. R. F. e TUBINO, D. F. Implantação do planejamento e controle da produção em pequenas e médias empresas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 19, 1999, Rio de Janeiro-RJ, **Anais... ABEPRO**, 2009, p. 1-18.

BONVIK, A. M. **How to control a lean manufacturing system**. 1 de out. 1999. Disponível em: <<http://web.mit.edu/manuf-sys/www/amb.summary.html>>. Acesso em: 2 mai. 2008.

BUZZO, W. R. e MOCCELLIN, J. V. Programação da produção em sistemas Flow Shop utilizando um método heurístico híbrido algoritmo genético Simulated Annealing. **Revista Gestão & Produção**, São Carlos-SP, v. 7, n. 3, p. 364-377, dec. 2000.

CASTRO, R. E. **Otimização de estruturas com multi-objetivos via algoritmos genéticos**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Rio de Janeiro – RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2001.

CLÍMACO, J.; ANTUNES, C.H. e ALVES, M.J.G. **Programação Linear Multiobjetivo: do modelo de programação linear clássico à consideração explícita de várias funções objetivo**. Imprensa da Universidade de Coimbra. 385 p, 2003.

COELLO, C. A. C. A comprehensive survey of evolutionary-based multiobjective optimization techniques. **Knowledge and Information Systems**, v.1, n. 3, p. 269-308, ago. 1999.

CORRÊA, H. L., GIANESI, I. G. N. e CAON, M. **Planejamento, Programação e Controle da produção**. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2001.

CORTES, J. M. R. **Um algoritmo genético para solução do problema de localização de**

atividades econômicas. Tese (Doutorado em Ciências de Engenharia) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual Norte Fluminense – UENF, 2003.

CURY, R. M. **Uma abordagem difusa para o problema de Flow-Shop Scheduling.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Florianópolis – SC, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 1999.

CSILLAG, J. M. e CORBETT, T. **Projeto de pesquisa de utilização da teoria das restrições no ambiente de manufatura em empresas no Brasil.** São Paulo: Núcleo de Pesquisas e Publicações – FGV, 1998.

FALCONE, M. A. G. **Estudo comparativo entre algoritmos genéticos e evolução diferencial para otimização de um modelo de cadeia de suprimento simplificada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Curitiba-PR, Pontifícia Universidade Católica do Paraná-PUC, 2004.

FERNANDES, F. C. F. **Concepção de um Sistema de Controle da Produção para a manufatura celular.** Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos - SP, 1991.

FERNANDES, F. C. F. e GODINHO, M. F. Sistemas de coordenação de ordens: revisão, classificação, funcionamento e aplicabilidade. **Revista Gestão & Produção**, São Carlos-SP, v. 14, n. 2, p. 337-352, maio-ago, 2007.

FONSECA, C. M. e FLEMING, P. J. An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization. **Evolutionary Computation**, vol. 3, no.1, pp. 1-16, 1995.

GAREY, M. R. e JOHNSON, D. S. **Computers and Intractability: The Theory of NP-Completeness.** Freeman, 1979.

GHOSH, S. **Production Planning and Scheduling in Flexible Manufacturing System Environment.** Tese (Doctor of Philosophy) – Columbus-OHIO, The Ohio State University, 1987.

GODINHO, M. F. **Paradigmas estratégicos de gestão da manufatura: configuração, relações com o Planejamento e Controle da Produção e estudo exploratório na indústria de calçados.** Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – São Carlos-SP, Universidade Federal de São Carlos-UFSC, 2004.

GOLDBERG, D.E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.**

Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachussets, 1989.

GOLDRATT, E. **The Haystack Syndrome: Sifting Information Out of the Data Ocean.** Great Barrington-MA: North River Press, 1991.

GROOVER, M. P. **Automation Production Systems and Computer Integrated Manufacturing.** Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632, 1987.

HOLLAND, J. **Adaptation in Natural and Artificial Systems.** Ed. Ann Arbor: Michigan Press, University of Michigan, 1975.

LANDMANN, R., BITTENCOURT, E., DEMÉTRIO, A. J. e STEUERNAGEL, A.L. Programação da produção em empresas metalúrgicas com utilização de algoritmo genético. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 26, 2006, Fortaleza-CE, **Anais...** ABEPRO, 2006, p. 1-18.

LENIVE, D. Genetic algorithms: a practitioner's view. **Journal on Computing**, v. 9, n. 3, p. 256-259, summer 1997.

LUH, P. B., GOU, L., NAGAHORA, T., TSUJI, M, YONEDA, K., HASEGAWA, T., KYOUYA, Y. e KANO, T. Job Shop Scheduling With Group-Dependent Setup, Finite Buffers, and Long Time Horizon. **Annals of Operations Research**, v. 76, p. 233-259, 1998.

MARTINS, S. V. **Gerenciamento de projeto: Meta-Heurísticas para otimização do escalonamento de atividades na exploração e produção de petróleo.** Tese (Doutorado em Ciências de Engenharia) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 2000.

MAZZUCO JUNIOR, J. **Uma abordagem híbrida do problema da programação da produção através dos algoritmos simulated annealing e genético.** Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Florianópolis - SC, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, 2001.

MONKS, J. G. **Administração da produção.** Primeira Edição, São Paulo, Editora McGraw-Hill, 1987.

MOREIRA, D. A. **Administração da Produção e Operações.** São Paulo: Editora Pioneira, 1993.

MONTEVECHI, J. A., TURRIONI, J. B., ALMEIDA, D. A. DE, MERGULHÃO, R. C. e LEAL, F. Análise comparativa entre regras heurísticas de sequenciamento da produção aplicada

em job shop. **Revista Produto & Produção**, Rio Grande do Sul-RS, v. 6, p. 12-18, jun. 2002.

OLIVARES, G. L. **Projeto de um jogo de empresas para a gestão integrada da produção**. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 2003.

OLIVEIRA, A. C. DE e SHIMIZU, T. Um algoritmo de busca genética híbrida para o problema de programação de tarefas em job shop dinâmico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 36, 2004, São João Del-Rei-MG. **Anais...** SOBRAPO, 2004. p. 1239-1247.

PALOMINO, R. C. **Um Modelo para o Planejamento e a Programação da Produção em Ambientes Job Shop Baseado em Redes de Petri**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - São Carlos-SP, Universidade Federal de São Carlos-UFSC, 2001.

PEROBA, L. E. **Administração da produção II**. 2007. Disponível em: <http://www.unicap.br/luis_peroba/Adm%20da%20ProdII%20P4.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2009.

PINEDO, M. **Scheduling – Theory, Algorithms and Systems**. Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs – NJ; 1995.

QUEZADO, P. C. A. M., CARDOSO, C. R. DE O. e TUBINO, D. F. Programação e Controle da Produção sob Encomenda Utilizando PERT/COM e Heurísticas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 19, 1999, Rio de Janeiro-RJ, **Anais...** ABEPRO, 2009, p. 1-20.

RAVETTI, M. G. **Problemas de sequenciamento com máquinas paralelas e tempos de preparação dependentes da sequência**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Belo Horizonte - MG, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2003.

RIBEIRO, S. A. **Sistema Imune Artificial para o problema de escalonamento Job Shop**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Vitória – ES, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, 2006.

SCHAFFER, J. D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. J.J. Grefenstette (ed.), In: Proceedings of the first international Conference on Genetic Algorithm and their applications, Lawrence Erlbaum, Hillsdale, New Jersey, p. 93-100, jul. 1985

SILIPRANDE, M. D, CORTES, J. M. R. e BRANDÃO, R. S. Modelo multi-objetivo para o problema de localização de antenas de transmissão para internet a rádio no município de Itaperuna. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 40, 2008, João Pessoa-PB. **Anais...** SOBRAPO, 2008. p. 1688-1697.

SILVA, A. R. DA **Um Método de Análise de Cenários para Sequenciamento da Produção Usando Lógica Nebulosa**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) - São Carlos-SP, Universidade Federal de São Carlos-UFSC, 2005.

SLACK, N., CHAMBERS, S., HARLAND, C., HARRINSON, A. e JOHNSTONS, R. **Administração da Produção**. 1. ed. São Paulo: Editora Atlas, 1997.

TICONA, W.G.C. **Aplicação de Algoritmos Genéticos Multi-Objetivo para Alinhamento de Sequências Biológicas**. Dissertação (Mestrado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) – São Paulo - SP, Universidade de São Paulo – USP, 2003.

TUBINO, D. F. **Manual de Planejamento e Controle da Produção**. São Paulo: Editora Atlas, 1997.

VARELA, M. L. R. **Uma Contribuição para o Escalonamento da Produção Baseado em Métodos Globalmente Distribuídos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Minho – PT, Universidade do Minho – Portugal, 2007.

ZHOU, H., FENG, Y. e HAN, L. The hybrid heuristic genetic algorithm for job shop scheduling. **Computers & Industrial Engineering**, v.40, p. 191-200, jul. 2001.

Anexos

Anexo A – Reportagem sobre o homem mais alto do mundo



15/04/2009 - 09h08

Chinês é homem mais alto do mundo com 2,46 metros de altura



Pequim, 15 abr (Lusa) - Com 2,46 metros de altura, Zhao Liang não terá dificuldade em convencer o júri do Guinness World Records e destronar o atual "homem mais alto do mundo", que mede "apenas" 2,36 metros.

A candidatura de Liang foi anunciada pela imprensa oficial chinesa nesta quarta-feira, um dia depois de ele ter operado um tendão num hospital de Tianjin, norte da China.

Liang, 27 anos, "está de boa saúde e não sofre de quaisquer complicações relacionadas com a sua altura", disse um cirurgião chinês.

Se a sua altura for confirmada pelo júri do Guinness, Liang irá ocupar o lugar do compatriota Bao Xishun, que mede menos dez centímetros.

O chinês, que chegou a tentar uma carreira como jogador de basquete na província natal, Henan, centro da China, é 17 centímetros mais alto que o gigante chinês da NBA, Yao Ming, dos Houston Rockets.

O pai de Zhao, no entanto, tem apenas 1,8 metro e a mãe 1,68 metro.

Aos 17 de idade, Zhao sofreu uma lesão muscular que o afastou do basquete e em 2006 um grupo artístico o contratou como mágico.

Depois da operação a que foi submetido, Zhao poderá voltar a andar normalmente dentro de dois meses, mas os médicos o aconselharam a parar de fazer exercícios físicos intensos.

© 1996-2009 UOL - O melhor conteúdo. Todos os direitos reservados.
Hospedagem: UOL Host

UOL Notícias **Chinês é o homem mais alto do mundo**. 15 de abr. 2009. Disponível em: <<http://noticias.uol.com.br/ultnot/lusa/2009/04/15/ult611u81135.jhtm>>. Acesso em: 21 abr. 2009.

Apêndices

Apêndice A – Melhores cromossomos encontrados nos testes do cenário 1

Melhor cromossomo para minimização Multiobjetivo e Custo Total:

2/Gc25/FJ - 4/Rc07/JKJF - 6/Rd32/JFKJ - 3/Ep02/JK - 4/Ct02/JF - 8/Rc02/FJK - 8/Be02/KFJ - 3/Es08/JK - 9/Mt32/FJ - 4/Pz08/JKJK - 6/Ab02/KFJ - 3/Cr32/JF <>
2/Ee02/NLO - 4/Ch02/ON - 1/Ex02/NL - 3/Cr32/ON - 9/Mt32/OM - 4/Ct02/M - 3/Ep02/M - 8/Be02/M - 8/Cx02/NOL - 3/Es08/M - 2/Bc02/NL - 2/Gc25/OM - 4/VI03/NL

MultiObjetivo= 4509,035

Tempos de Setup= 263

Caminho Crítico= 3570

Custo Total= 11372,45

Custo com Atraso= 121,2

Geração que foi encontrado= 169

Melhor cromossomo para minimização Custo com Atraso:

2/Gc25/FJ - 4/Rc07/JKJF - 6/Rd32/JFKJ - 3/Ep02/JK - 8/Be02/KFJ - 4/Ct02/JF - 8/Rc02/FJK - 9/Mt32/FJ - 3/Es08/JK - 4/Pz08/JKJK - 3/Cr32/JF - 6/Ab02/KFJ <>
2/Gc25/OM - 4/Ch02/ON - 1/Ex02/NL - 9/Mt32/OM - 3/Ep02/M - 8/Be02/M - 4/Ct02/M - 3/Cr32/ON - 2/Bc02/NL - 8/Cx02/NOL - 3/Es08/M - 4/VI03/NL - 2/Ee02/NLO

MultiObjetivo= 4616,985

Tempos de Setup= 303

Caminho Crítico= 3745

Custo Total= 11543,95

Custo com Atraso= 63,6

Geração que foi encontrado= 111

Melhor cromossomo para minimização do Tempo de Setup:

2/Gc25/FJ - 4/Rc07/JKJF - 6/Rd32/JFKJ - 3/Ep02/JK - 3/Es08/JK - 8/Be02/KFJ - 8/Rc02/FJK - 4/Ct02/JF - 4/Pz08/JKJK - 9/Mt32/FJ - 6/Ab02/KFJ - 3/Cr32/JF <>
3/Cr32/ON - 2/Bc02/NL - 4/Ch02/ON - 1/Ex02/NL - 2/Ee02/NLO - 9/Mt32/OM - 4/VI03/NL - 8/Cx02/NOL - 3/Ep02/M - 8/Be02/M - 3/Es08/M - 2/Gc25/OM - 4/Ct02/M

MultiObjetivo= 5047,235

Tempos de Setup= 188

Caminho Crítico= 3550

Custo Total= 13211,45

Custo com Atraso= 2082

Geração que foi encontrado = 171

Melhor cromossomo para minimização do Caminho Crítico:

4/Ct02/JF - 6/Rd32/JFKJ - 4/Rc07/JKJF - 8/Be02/KFJ - 2/Gc25/FJ - 9/Mt32/FJ - 3/Es08/JK - 3/Ep02/JK - 6/Ab02/KFJ - 8/Rc02/FJK - 4/Pz08/JKJK - 3/Cr32/JF <>
4/VI03/NL - 3/Cr32/ON - 2/Bc02/NL - 4/Ch02/ON - 8/Cx02/NOL - 2/Gc25/OM - 4/Ct02/M - 1/Ex02/NL - 2/Ee02/NLO - 9/Mt32/OM - 3/Es08/M - 8/Be02/M - 3/Ep02/M

MultiObjetivo= 4749,415

Tempos de Setup= 256

Caminho Crítico= 3500

Custo Total= 12246,05

Custo com Atraso= 1022,8

Geração que foi encontrado = 6

Apêndice B – Melhores cromossomos encontrados nos testes do cenário 2

Melhor cromossomo para minimização Multiobjetivo e Custo Total:

4/Tr10/FJFG - 2/Cp25/JGF - 4/To43/FJ - 4/Cp27/FJFG - 2/Ts43/FJ - 4/Cp05/JH - 3/Cp01/JG - 4/Cp22/FJFG - 6/Cp28/JFGJ - 7/To67/FJFG - 1/Cp17/HJE - 5/Tr07/FJFG - 2/Tr08/FJFG - 6/Ts20/JF - 9/Ts71/GI - 3/Ts44/JG - 1/Cp11/J - 1/Cp31/FH - 3/Ts28/JH - 1/Tr02/JG - 6/To08/GJ - 2/Tr06/FJFK - 3/Ts58/JF - 2/Tr05/FJF - 2/To13/JF <> 4/To43/M - 1/Cp17/N - 3/Ts44/M - 2/Ts43/M - 1/To28/NO - 3/Cp01/L - 1/Ts25/OM - 5/Tr07/M - 2/Tr08/M - 3/Ts16/MLON - 6/Ts20/L - 9/Ts71/M - 2/To13/L - 1/Cp11/L - 4/Cp22/LM - 1/Cp31/ML - 6/To08/MO - 1/Ts06/NO - 2/Tr06/L - 1/Tr02/LM

MultiObjetivo= 7016,71

Tempos de Setup= 634

Caminho Crítico= 5324

Custo Total= 17853,7

Custo com Atraso= 636,45

Melhor cromossomo para minimização Tempo de Setup:

4/Tr10/FJFG - 4/Cp22/FJFG - 2/Cp25/JGF - 5/Tr07/FJFG - 3/Cp01/JG - 1/Cp31/FH - 4/To43/FJ - 4/Cp05/JH - 4/Cp27/FJFG - 6/Ts20/JF - 2/Tr05/FJF - 2/Ts43/FJ - 3/Ts44/JG - 2/Tr06/FJFK - 1/Cp11/J - 1/Cp17/HJE - 2/Tr08/FJFG - 7/To67/FJFG - 6/To08/GJ - 6/Cp28/JFGJ - 9/Ts71/GI - 1/Tr02/JG - 3/Ts58/JF - 2/To13/JF - 3/Ts28/JH <> 1/Cp17/N - 3/Ts44/M - 2/To13/L - 4/To43/M - 1/Ts25/OM - 1/Cp31/ML - 2/Ts43/M - 6/To08/MO - 3/Cp01/L - 1/Ts06/NO - 3/Ts16/MLON - 2/Tr06/L - 1/To28/NO - 9/Ts71/M - 6/Ts20/L - 1/Cp11/L - 4/Cp22/LM - 2/Tr08/M - 5/Tr07/M - 1/Tr02/LM

MultiObjetivo= 14948,415

Tempos de Setup= 411

Caminho Crítico= 8745

Custo Total= 40946,05

Custo com Atraso= 18154,5

Geração que foi encontrado= 250

Melhor cromossomo para minimização Caminho Crítico:

3/Ts44/JG - 2/Tr06/FJFK - 6/Ts20/JF - 4/Cp27/FJFG - 1/Cp11/J - 6/Cp28/JFGJ - 1/Cp31/FH - 2/Tr05/FJF - 7/To67/FJFG - 6/To08/GJ - 2/To13/JF - 2/Tr08/FJFG - 4/Cp05/JH - 3/Ts28/JH - 4/Tr10/FJFG - 1/Cp17/HJE - 3/Cp01/JG - 9/Ts71/GI - 4/To43/FJ - 2/Cp25/JGF - 5/Tr07/FJFG - 2/Ts43/FJ - 1/Tr02/JG - 4/Cp22/FJFG - 3/Ts58/JF <> 1/Cp17/N - 2/To13/L - 3/Ts16/MLON - 3/Ts44/M - 2/Ts43/M - 4/To43/M - 6/Ts20/L - 1/Ts25/OM - 1/Ts06/NO - 1/Cp31/ML - 1/Cp11/L - 1/To28/NO - 6/To08/MO - 9/Ts71/M - 3/Cp01/L - 1/Tr02/LM - 5/Tr07/M - 2/Tr08/M - 2/Tr06/L - 4/Cp22/LM

MultiObjetivo= 9495,02

Tempos de Setup= 596

Caminho Crítico= 5235

Custo Total= 26216,4

Custo com Atraso= 8877,75

Geração que foi encontrado= 126

Melhor cromossomo para minimização Custo com Atraso:

4/Tr10/FJFG - 2/Cp25/JGF - 4/To43/FJ - 4/Cp27/FJFG - 2/Tr05/FJF - 2/Ts43/FJ -
3/Cp01/JG - 4/Cp22/FJFG - 6/Cp28/JFGJ - 7/To67/FJFG - 1/Cp17/HJE -
2/Tr08/FJFG - 5/Tr07/FJFG - 4/Cp05/JH - 6/Ts20/JF - 9/Ts71/GI - 1/Cp11/J -
3/Ts28/JH - 1/Cp31/FH - 1/Tr02/JG - 6/To08/GJ - 2/Tr06/FJFK - 3/Ts44/JG -
3/Ts58/JF - 2/To13/JF <> 4/To43/M - 1/Cp17/N - 3/Ts44/M - 2/Ts43/M - 4/Cp22/LM
- 3/Cp01/L - 1/Ts25/OM - 6/To08/MO - 2/Tr08/M - 3/Ts16/MLON - 6/Ts20/L -
9/Ts71/M - 2/To13/L - 1/Cp11/L - 1/To28/NO - 1/Cp31/ML - 5/Tr07/M - 1/Ts06/NO -
1/Tr02/LM - 2/Tr06/L

MultiObjetivo= 7485,545

Tempos de Setup= 746

Caminho Crítico= 5933

Custo Total= 18770,15

Custo com Atraso= 520,3

Geração que foi encontrado= 92

Apêndice C – CD com dados dos testes computacionais

Apêndice D – Tabela com dados reais dos cenários aplicados

Dados reais do cenário 1										
Códigos	Quantidade	Tarefas Maq 1	Tempo Maq 1	Custo Maq 1	Tarefas Maq 2	Tempo Maq 2	Custo Maq 2	Dependencia	Prazo	Custo Atraso
Gc25	2	FJ	132	217,8	OM	154	254,1	1	450	0,4
Rc07	4	JKJF	400	660	-	-	-	3	856	0,4
Ch02	4	-	-	-	ON	176	290,4	4	920	0,4
Rd32	6	JFKJ	96	158,4	-	-	-	3	1306	0,4
Ep02	3	JK	588	970,2	M	188	310,2	1	1986	0,4
Ex02	1	-	-	-	NL	315	519,75	4	2065	0,4
Be02	8	KFJ	360	594	M	285	470,25	1	2081	0,4
Rc02	8	FJK	138	227,7	-	-	-	3	2081	0,4
Ct02	4	JF	94	155,1	M	160	264	1	2122	0,4
Mt32	9	FJ	570	940,5	OM	522	861,3	0	2522	0,4
Bc02	2	-	-	-	NL	356	587,4	4	2600	0,4
Es08	3	JK	373	615,45	M	135	222,75	1	2616	0,4
Cx02	8	-	-	-	NOL	272	448,8	4	2805	0,4
Cr32	3	JF	164	270,6	ON	111	183,15	2	2850	0,4
Pz08	4	JKJK	122	201,3	-	-	-	3	3081	0,4
VI03	4	-	-	-	NL	332	547,8	4	3200	0,4
Ee02	2	-	-	-	NLO	340	561	4	3400	0,4
Ab02	6	KFJ	90	148,5	-	-	-	3	3467	0,4

Dados reais do cenário 2										
Códigos	Quantidade	Tarefas Maq 1	Tempo Maq 1	Custo Maq 1	Tarefas Maq 2	Tempo Maq 2	Custo Maq 2	Dependencia	Prazo	Custo Atraso
Tr10	4	FJFG	240	396	-	-	-	3	300	0,6
Cp25	2	JGF	66	108,9	-	-	-	3	360	0,6
To43	4	FJ	240	396	M	180	297	0	480	0,4
Cp27	4	FJFG	180	297	-	-	-	3	720	0,25
Ts43	2	FJ	170	280,5	M	100	165	0	1020	0,05
Ts44	3	JG	285	470,25	M	105	173,25	0	1020	0,05
Cp17	1	HJE	45	74,25	N	10	16,5	2	1200	0,25
Cp28	6	JFGJ	330	544,5	-	-	-	3	1320	0,25
To67	7	FJFG	175	288,75	-	-	-	3	1320	0,25
Cp01	3	JG	66	108,9	L	45	74,25	1	1800	0,25
Cp22	4	FJFG	152	250,8	LM	108	178,2	1	1800	0,4
Tr07	5	FJFG	270	445,5	M	100	165	1	2220	0,25
Tr08	2	FJFG	90	148,5	M	46	75,9	1	2220	0,4
Cp05	4	JH	108	178,2	-	-	0	3	2400	0,4
Ts25	1	-	-	-	OM	90	148,5	4	2520	0,4
Ts16	3	-	-	-	MLON	1080	1782	4	2700	0,4
Ts20	6	JF	120	198	L	150	247,5	1	2700	0,25
Ts28	3	JH	360	594	-	-	-	3	3000	0,25
Ts71	9	GI	450	742,5	M	180	297	1	3000	0,05
Cp11	1	J	65	107,25	L	25	41,25	1	3240	0,25
Cp31	1	FH	180	297	ML	30	49,5	1	3600	0,4
To28	1	-	-	-	NO	1500	2475	4	3600	0,05
To13	2	JF	600	990	L	360	594	2	4200	0,25
To08	6	GJ	450	742,5	MO	216	356,4	0	4500	0,4
Tr02	1	JG	33	54,45	LM	40	66	1	4800	0,05
Ts06	1	-	-	-	NO	180	297	4	5100	0,05
Ts58	3	JF	225	371,25	-	-	-	3	5100	0,4
Tr05	2	FJF	56	92,4	-	-	-	3	5400	0,05
Tr06	2	FJFK	74	122,1	L	50	82,5	1	5400	0,05

Glossário

A

Algoritmo: Sequência de passos bem definidos, estruturados e organizados hierarquicamente, que permite resolver um problema ou gerar um resultado quando executado.

Algoritmos Evolucionários: São extensões dos Algoritmos Genéticos. Utilizam modelos computacionais de processamento evolucionário no desenvolvimento de sistemas de computação para resolver problemas complexos. Baseia-se conceitualmente em simulações da evolução através de três operadores básicos: seleção, cruzamento e mutação.

Algoritmos Genéticos: Algoritmos evolutivos. Possuem características evolutivas baseada na teoria da evolução Darwinista. Foi inicialmente proposto por John Holland em 1975.

C

Classe NP: Compreende todos os problemas da Classe NP (Não Polinomial) sem solução em tempo polinomial viável.

Cromossomo: Conjunto ou cadeias de genes que determina as características dos indivíduos.

Crossover: Operadores genéticos de cruzamento ou recombinação dos indivíduos.

G

Gene: Unidade fundamental da hereditariedade. Cada gene é formado por uma sequência específica de ácidos nucléicos. O conjunto dos genes de um organismo, população ou espécie constitui o genoma.

Gráfico de Gantt: Um gráfico usado para ilustrar o avanço das diferentes etapas de um projeto. Os intervalos de tempo representando o início e fim de cada fase aparecem como barras coloridas sobre o eixo horizontal do gráfico.

H

Heurística: Método de solução de problemas indutivo baseado em regras derivadas do sendo comum ou da experiência de um modelo teórico da matemática.

J

Job Shop: Escalonar recursos ou processos em postos de trabalho para executar uma coleção de tarefas (*jobs*) de acordo com o objetivo de produção.

Just in Time: Sistema Toyota de Produção ou Produção enxuta.

M

Makespan: Resultado do processamento ou medida de desempenho obtida pela duração total de um escalonamento.

Mutação: Mudança, Transformação. Modificação casual ou induzida da informação genética de um indivíduo.

N

NP Completo: Subconjunto de problemas da classe NP, que possui a seguinte surpreendente propriedade: se qualquer um deles puder ser resolvido em tempo polinomial determinístico, então todos os outros problemas NP também podem.

O

Otimização: Aplicação de métodos e modelos a determinado problema, analisando e avaliando todas as restrições possíveis com o intento de alcançar a melhor solução.

S

Scheduling: Agendamento, programação, escalonamento. Atividade de sequenciamento ou processamento de tarefas. Trata-se geralmente de um problema da classe *Job Shop*.

Soluções de elite: Termo associado a soluções encontradas nos Algoritmos Genéticos como resposta para problemas multiobjetivo.

Soluções Pareto-Ótimas: Conjunto de soluções dominantes do problema.

T

TOC: Teoria das restrições uma filosofia de negócios introduzida por Eliyahu M. Goldratt no seu livro *A Meta*, de 1984. Ela é baseada na aplicação de princípios científicos e do raciocínio lógico para guiar organizações humanas.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)