



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

HELDER CARLO BELAN

**MÉTODO ADAPTATIVO DE PROGRAMAÇÃO DA
PRODUÇÃO APOIADO POR UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE
DESEMPENHO E MELHORIA CONTÍNUA**

Londrina
2011

HELDER CARLO BELAN

**MÉTODO ADAPTATIVO DE PROGRAMAÇÃO DA
PRODUÇÃO APOIADO POR UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE
DESEMPENHO E MELHORIA CONTÍNUA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Ciência da Computação, Departamento de Computação da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre

Orientadora: Profa. Dra. Jandira Guenka Palma

Londrina
2011

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da
Universidade Estadual de Londrina.**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

B426m Belan, Helder Carlo.
Método adaptativo de programação da produção apoiado por um sistema de
medição de desempenho e melhoria contínua/ Helder Carlo Belan. –
Londrina, 2011.
105 f.: il.

Orientador: Jandira Guenka Palma.
Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Estadual
de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em
Ciência da Computação, 2011.
Inclui bibliografia

1. Pesquisa operacional – Processamento de dados – Teses. 2.
Administração da produção – Processamento de dados – Teses. 3.
Produtividade industrial – Teses. I. Palma, Jandira Guenka. II. Universidade
Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação
em Ciência da Computação. III. Título.

CDU 519.8

HELDER CARLO BELAN

**MÉTODO ADAPTATIVO DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO
APOIADO POR UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO E
MELHORIA CONTÍNUA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Ciência da Computação, Departamento de Computação da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre

BANCA EXAMINADORA

Orientadora. Profa. Dra. Jandira Guenka Palma
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Edilson Reis Rodrigues Kato.
Universidade Federal de São Carlos – USCAR

Profa. Dra. Maria Angélica de Oliveira Camargo-
Brunetto.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul –
UFRGS

Prof. Dr. Dirceu Moreira Guazzi.
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 29 de setembro de 2011.

A Deus em primeiro lugar, por estar presente em todos os meus momentos, sendo minha luz e direção.

À minha família por me encorajar e seguir sempre ao meu lado. Em especial ao meu filho que nem nasceu, mas já mudou a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente a minha orientadora por sempre acreditar no meu trabalho e por me ajudar nos momentos em que mais precisei de sua disposição e paciência.

Agradeço à Universidade Estadual de Londrina por proporcionar este ambiente de estudo e pesquisa tão importante para minha vida acadêmica desde minha graduação.

Agradeço às instituições Fundação Araucária e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ, que nos ajudaram na execução deste trabalho através de incentivos e auxílios financeiros.

Agradeço também a empresa Guenka Software e o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI por colaborarem disponibilizando o tempo necessário para me dedicar à realização deste trabalho; de maneira especial à empresa Guenka Software por disponibilizar as ferramentas de estudo para este trabalho, e acreditar no desenvolvimento destes novos produtos.

Por fim agradeço a empresa do setor moveleiro que disponibilizou as informações para o estudo de caso e permitiu que este trabalho obtivesse êxito.

BELAN, Helder Carlo. **Método adaptativo de programação da produção apoiado por um sistema de medição de desempenho e melhoria contínua**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2011.

RESUMO

Nas indústrias de manufatura, um dos principais problemas enfrentados é a baixa liquidez dos investimentos devido à elevada imobilização de capital, desta forma, as indústrias necessitam de um planejamento que forneça um controle fino de cronograma da produção e distribuição de matéria prima e recursos no chão de fábrica, para o melhor aproveitamento da capacidade produtiva, reduzindo os estoques em processo e melhor satisfação dos clientes com prazos de entregas mais precisos. Neste âmbito este trabalho propõe um método de programação da produção apropriado/adaptado às necessidades de cada indústria englobando uma ou mais técnicas de sequenciamento que devem gerar soluções melhores à medida que são adaptadas às necessidades do cenário produtivo. Denominado de MAP-Prod o método deve incorporar características de duas abordagens: reativa no tratamento de rupturas durante a execução e proativa no aperfeiçoamento dos parâmetros a cada fim de ciclo de produção. O ciclo de adaptação será caracterizado por ações de melhoria encontradas através da coleta de informações sobre a execução do plano de produção e análise de indicadores em um sistema de medição de desempenho. Essas adaptações à técnica de sequenciamento serão acompanhadas por um sistema de melhoria contínua para diagnosticar a eficácia dessas alterações.

Palavras chave: Programação da Produção. Método Adaptativo. Medição de Desempenho. Melhoria Contínua. MAP-Prod.

BELAN, Helder Carlo. **Método adaptativo de programação da produção apoiado por um sistema de medição de desempenho e melhoria contínua**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2011.

ABSTRACT

One of the main problems faced by manufacture industries is the low liquidity of investments due to the high immobilization of capital. In this way, industries need a plan able to provide them a fine control of the production schedule and distribution of raw materials as well as resources in the shop floor for the best use of production capacity, reducing work-in-process and better customer satisfaction once you will have a more precise delivery term. In this context this paper proposes a method of production scheduling appropriate / tailored to the needs of each industry comprising one or more scheduling techniques that should produce better solutions as they are tailored to the needs of the productive scenario. Named as MAP-Prod, the method should incorporate features of two approaches: reactive on the disruption corrections during the execution and proactive on the improvement of its parameters at the end of each production cycle. The adaptive cycle will be characterized by improvement actions found by collecting information about the implementation of the production plan as the analysis of indicators in a performance measurement system. These adjustments to the scheduling techniques will be followed up by a continuous improvement system that will diagnose the effectiveness of those changes.

Keyword: Production Scheduling. adaptive method. Performance Measurement. Continuous Improvement. MAP-Prod

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo do problema de máquina única	16
Figura 2 - Modelo do problema de Máquinas em paralelo	16
Figura 3 - Modelo do problema para Flow Shop	17
Figura 4 - Modelo do problema para Flexible Flow Shop	17
Figura 5 - Modelo do problema para Job Shop.....	17
Figura 6 - Modelo do problema para Flexible Job Shop.....	18
Figura 7 - Ciclo PDCA.....	21
Figura 8 - Fluxograma ilustrando funcionamento do algoritmo <i>Shifting Bottleneck</i>	24
Figura 9 - Topologia modelo para redes neurais de Hopfield.....	26
Figura 10 - Topologia modelo para Perceptron Multicamadas.....	26
Figura 11 - Topologia modelo para redes neurais competitivas	27
Figura 12 - Estrutura básica do algoritmo genético	30
Figura 13 - Visão Sistêmica da Medição de Desempenho (NEELY et al., 1995)	44
Figura 14 - Ilustração do modelo de integração entre as ferramentas APS, MES e ERP por Liu et al [25].....	46
Figura 15 - Método MAP-PROD “Método Adaptativo da Programação da Produção” (diagrama de atividade em UML de cada horizonte curto de planejamento).....	48
Figura 16 - Exemplo de gráfico aranha para análise de soluções	53
Figura 17 - Visão geral da gestão do ciclo de melhoria continua proposto por Gerolamo [17]	62
Figura 18 - Integração entre os sistemas cooperantes para a proposta de sistema adaptativo	64
Figura 19 - Integração das Ferramentas do Estudo de Caso	71
Figura 20 - Cadastro de ficha técnica com roteiro de fabricação na ferramenta ERP	72
Figura 21 - Cadastro de ordens de produção na ferramenta ERP	73
Figura 22 - Técnicas de sequenciamento disponíveis na ferramenta APS.....	73
Figura 23 - Visualização dos dados do problema na ferramenta APS	74
Figura 24 - Gráfico de gantt gerado a partir de uma solução GRASP	74
Figura 25 - Gráfico aranha para análise das soluções geradas pela ferramenta APS.....	75
Figura 26 - Ferramenta de coleta e acompanhamento (MPI).....	76
Figura 27 - Monitoramento das máquinas e registros do turno para a máquina selecionada	77

Figura 28 - Cadastro de indicadores na ferramenta SMC	78
Figura 29 - Acompanhamento dos Indicadores na ferramenta SMD	78
Figura 30 - Tela do SMC para acompanhamento dos objetivos cadastrados dividido em perspectivas	79
Figura 31 - Solução gerada pela ferramenta APS para os dados de produção	83
Figura 32 - Programação primeira semana (segunda a quinta)	84
Figura 33 - Programação primeira semana (sexta e sábado)	85
Figura 34 - Programação segunda semana (segunda e terça)	85
Figura 35 - Programação segunda semana (quarta a sábado)	86
Figura 36 - Programação terceira semana (segunda a quinta)	87
Figura 37 - Programação terceira semana (sexta e sábado)	88
Figura 38 - Programação quarta semana (segunda e terça)	88
Figura 39 - Programação quarta semana (quarta a sábado)	89
Figura 40 - Programação da segunda semana utilizando tempos padrões ajustados de acordo com coleta de dados da primeira semana (segunda e terça)	91
Figura 41 - Programação da segunda semana utilizando tempos padrões ajustados de acordo com coleta de dados da primeira semana (quarta a sábado)	92
Figura 42 - Programação da terceira semana utilizando tempos padrões ajustados de acordo com coleta de dados da primeira e segunda semanas (segunda a quinta)	93
Figura 43 - Programação da terceira semana utilizando tempos padrões ajustados de acordo com coleta de dados da primeira e segunda semanas (sexta e sábado)	94
Figura 44 - Programação quarta semana utilizando tempos padrões ajustados de acordo com coleta de dados da primeira, segunda e terceira semanas (segunda e terça)	94
Figura 45 - Programação quarta semana utilizando tempos padrões ajustados de acordo com coleta de dados da primeira, segunda e terceira semanas (quarta a sábado)	95
Figura 46 - Estrutura baseada na metodologia BSC da ferramenta de Medição de Desempenho e Melhoria Contínua	98
Figura 47 - Painel de Desempenho do Indicador de Robustez	99
Figura 48 - Painel de gerenciamento e acompanhamento das adaptações do modelo de programação (ações de melhoria)	99

LISTA DE ABREVIATURAS

APS	<i>Advanced Planning and Scheduling</i> (ferramenta avançada para programação da produção)
BSC	<i>Balanced Scorecard</i> (Metodologia de medição e gestão de desempenho)
CLP	Controlador Lógico Programável
ERP	<i>Enterprise Resources Planning</i> (Sistema de Gestão Integrado)
FIFO	<i>First in First out</i> (regra de ordenação em fila onde o primeiro a entrar é o primeiro a sair)
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i> (algoritmo de sequenciamento de operações)
MAP-Prod	Método Adaptativo de Programação da Produção proposto neste trabalho
MES	<i>Manufacturing Execution System</i> (Sistema de Acompanhamento da Execução da Manufatura)
MPS	<i>Master Production Schedule</i>
MRP	<i>Material Requirement Planning</i> (planejamento das necessidades de materiais)
MRPII	<i>Manufacturing Resource Planning</i> (Planejamento dos recursos de manufatura)
PDCA	<i>Plan, Do, Check, Action</i> (Ciclo de acompanhamento de ações de melhoria)
PMP	Planejamento Mestre da Produção
PPCP	Planejamento, Programação e Controle da Produção
SMC	Sistema de Melhoria Contínua
SMD	Sistema de Medição de Desempenho
WIP	Work in Process (Material em processo)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO	15
2.1.1	Propósitos da Programação	20
2.2	FUNDAMENTOS DA MELHORIA CONTÍNUA E CICLO PDCA	20
2.3	TÉCNICAS DE SEQUENCIAMENTO	22
2.3.1	Métodos exatos	22
2.3.2	Regras de despacho	23
2.3.3	Shifiting Bottleneck	24
2.3.4	Redes Neurais	25
2.3.5	Buscas Locais	27
2.4	APLICAÇÃO DOS ALGORITMOS DE SEQUENCIAMENTO EM UM AMBIENTE REAL	30
2.4.1	Abordagem Proativa	33
2.4.2	Abordagem Reativa	34
2.4.3	Abordagem Progressiva	35
2.5	MEDIÇÃO DE DESEMPENHO DA PROGRAMAÇÃO	35
2.5.1	Quanto ao resultado da programação	35
2.5.2	Quanto à execução da programação	37
2.6	MÉTODOS ADAPTATIVOS	40
2.6.1	Arquitetura	42
3	PROPOSTA DE UM MÉTODO DE PROGRAMAÇÃO ADAPTATIVO COM APOIO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO E MELHORIA CONTÍNUA	47
3.1	FASE DO PLANEJAMENTO	49
3.1.1	Planejamento Mestre da Produção	49
3.1.2	Geração das Ordens de Fabricação	50
3.1.3	Definição das Restrições do Processo	51
3.1.4	Definição da Capacidade e Disponibilidade dos Recursos	51
3.1.5	Execução dos Algoritmos e Simulação das Possíveis Soluções	52
3.1.6	Escolha da Solução e Análise das Técnicas	53
3.1.7	Estabelecimento da Solução Preditiva	54
3.1.8	Outras Programações	54

3.2	FASE DA EXECUÇÃO	55
3.2.1	Rupturas na Programação	56
3.3	FASE DE ANÁLISE	57
3.3.1	Cálculo dos Indicadores	57
3.3.2	Análise das Ações de Melhoria	58
3.3.3	Novas Ações de Melhoria	59
3.4	FASE DE AÇÕES DE MELHORIA	62
3.5	ARQUITETURA E INTERFACE ENTRE SISTEMAS	63
3.6	CONSIDERAÇÕES	66
4	ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DO MAP-PROD NA INDÚSTRIA	
	MOVELEIRA	68
4.1	AMBIENTE	68
4.2	FERRAMENTAS	69
4.2.1	Sistema de Gestão Integrada (SGI)	71
4.2.2	Módulo de Sequenciamento de Máquina (MSM)	73
4.2.3	Sistema de Monitoramento de Processos Industriais (MPI).....	76
4.2.4	Sistema de Medição de Desempenho e Melhoria Contínua (SMD/ SMC).....	77
4.3	APLICAÇÃO MAP-PROD.....	79
4.3.1	Formulação do Problema.....	79
4.3.2	Parametrização Inicial	80
4.3.3	Simulações.....	81
4.4	ANÁLISE DE RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES.....	82
4.4.1	Simulação de Otimização de Recursos com a Utilização das Técnicas de Sequenciamento e Ferramenta APS	82
4.4.2	Simulação de Adaptação do Método de Programação	90
4.4.3	Simulação de Utilização do Sistema de Medição de Desempenho e Melhoria Contínua como Apoio ao Gerenciamento do Processo Evolutivo	97
4.5	CONSIDERAÇÕES	100
5	CONCLUSÃO.....	101
5.1	TRABALHOS FUTUROS	102
	REFERÊNCIAS	103

1 INTRODUÇÃO

As organizações encontram-se em um ambiente de alta competição, devido, principalmente, à concorrência global e aos avanços tecnológicos, como consequência tem-se incessante busca por diferenciais competitivos. Tais diferenciais muitas vezes podem ser obtidos por meio de melhorias nos processos produtivos, ações que gerem, por exemplo, minimização de custos e/ou apoio a redução do prazo de entrega dos produtos.

Neste contexto, a atividade de Planejamento, Programação e Controle da Produção (PPCP), na manufatura, desempenha um papel de extrema importância. Especificamente no sequenciamento de operações, atividade diretamente associada ao PPCP, no qual as decisões que direcionam a ordem em que os produtos devem ser fabricados, respeitando prioridades e restrições impostas pelo processo, impactam consideravelmente nos prazos de entrega do produto para o cliente e nos custos.

O uso de informações imprecisas na tomada de decisões de uma empresa pode ocasionar quedas de produtividade por diversos motivos, por isso problemas relacionados com a gestão da produção como a programação e o planejamento são temas de grande preocupação para as indústrias, busca-se o aperfeiçoamento e excelência nos processos produtivos visando a minimização de custos, flexibilidade, redução do prazo de entrega dos produtos entre outros diferenciais que as façam se destacar entre seus concorrentes.

Sendo assim, a programação da produção que tem como objetivo a definição de prazos através do sequenciamento das ordens de fabricação, ou seja, a alocação dos recursos da fábrica durante um período para a realização de um determinado conjunto de tarefas, pode se tornar um difícil processo de decisão na maioria das indústrias, entretanto um bom sequenciamento da produção pode obter inúmeros benefícios [34].

Pesquisas na área começaram em meados do século XX. Os primeiros livros que abordavam o tema de sequenciamento industrial e teoria de programação foram publicados na década de 60, entre os quais pode ser destacado *Theory of Scheduling* de Conway, Maxwell e Miller em 1967, que viria a ser adotado como uma das principais referências bibliográficas na área de programação da produção [40]. Ainda há um grande esforço para a criação de novos métodos e técnicas para otimização da programação da produção, a qual pode ser considerada uma das atividades mais complexas no âmbito do Planejamento, Programação e Controle da Produção - PPCP.

O que torna essa atividade um exercício complexo, além das inúmeras soluções possíveis, são as variáveis que devem ser consideradas em sua realização, como

datas de entregas diferentes para ordens de um mesmo produto, setup com tempos e atividades variáveis em função da ordem anterior, roteiros diversos com produtividades diferentes, a importância relativa dos produtos é inconstante, máquinas quebram, matérias-primas podem não estar disponíveis, problemas de qualidade podem ocorrer, operações podem ter restrições de tamanho de lote, necessidade de reprogramações por motivos diversos entre outros.

O procedimento para fazer o sequenciamento da produção geralmente inicia-se com um conjunto de atividades, que devem satisfazer um conjunto de restrições temporais e de recursos, e busca-se por um cronograma com tempos precisos de início e fim de cada atividade nos recursos alocados. Um critério de otimização classifica as soluções na busca pelo melhor cronograma [7].

Apesar de o problema ser classificado como NP-Completo¹ devido a sua complexidade computacional, hoje já se consegue encontrar vários métodos e técnicas para auxiliar a programação da produção, inúmeros algoritmos conseguem em tempo hábil encontrar boas soluções para cada tipo de processo produtivo. Entretanto há um grande problema em ambientes reais, onde nem sempre a programação escolhida pode ser seguida à risca, pois eventos inesperados podem gerar discrepâncias entre o que foi planejado e o que realmente aconteceu. Existe uma dinamicidade do ambiente, onde alterações como mudanças de funcionários, troca de ferramentas, inserção de novos produtos e mau funcionamento de máquinas podem gerar uma necessidade de ajuste dos parâmetros e técnicas de programação utilizados; portanto um método adaptativo que se adeque a essas mudanças pode melhorar a programação com os novos parâmetros mais próximos do real.

Pode-se então equiparar essas adaptações do modelo da programação da produção a um processo de melhoria contínua (onde objetiva-se encontrar os melhores parâmetros e as melhores técnicas de sequenciamento de atividades para a atual configuração do processo produtivo da empresa).

A ideia de melhoria contínua está relacionada à capacidade de resolução de problemas por meio de pequenos passos, alta frequência e ciclos curtos de mudança. Esses ciclos de mudança são causados pela alternância de momentos de ruptura e de controle no desempenho. ([6] apud [1]).

¹ Na teoria da complexidade computacional, a classe de complexidade NP-completo é o subconjunto dos problemas de decisão em NP (Tempo polinomial não determinístico) de tal modo que todo problema em NP se pode reduzir, com uma redução de tempo polinomial, a um dos problemas NP-completo.

Para garantir que o processo de melhoria alcance seus objetivos tem-se a medição de desempenho como arma fundamental para mensurar os avanços em cada adaptação e orientar corretamente as ações para convergência de um método de programação condizente com as realidades do ambiente produtivo da empresa.

Neste trabalho é proposto um método de programação da produção que haja de maneira adaptativa, ajustando os parâmetros e técnicas utilizadas para o sequenciamento de atividades de acordo com as orientações de um sistema de melhoria contínua e medição de desempenho.

No capítulo 2 será descrito o levantamento bibliográfico onde será abordado sobre as formas de modelagem do problema, técnicas utilizadas, formas de medição do desempenho de um sequenciamento, fundamentos de melhoria contínua e definições sobre os métodos adaptativos; já no capítulo 3 será exemplificado o método proposto com a arquitetura entre os sistemas, indicadores de desempenho e formas de adaptações durante o processo de melhoria contínua. Por último, no capítulo 4 serão mostrados os resultados obtidos com a aplicação do método proposto em uma indústria do setor moveleiro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Por se tratar de um assunto multidisciplinar, neste capítulo é descrito muitos conceitos já pré-concebidos sobre temas relacionados à engenharia de produção para embasar os temas referentes ao sequenciamento da produção e métodos adaptativos.

2.1 PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

Dentro de uma empresa o departamento de PPCP (Planejamento Programação e Controle da Produção) é responsável pelo gerenciamento da produção, o que compreende várias funções como administração dos recursos produtivos e geração das ordens de fabricação para atender a demanda comercial através da carteira de pedidos ou manutenção do estoque de produtos acabados. Dentre todas suas funções a programação da produção se destaca pela sua complexidade, e pode ser realizada em três níveis de planejamento para tomada de decisões: a longo, médio e curto prazo.

Em um horizonte a longo prazo, as decisões estratégicas devem ser tomadas levando em consideração a previsão de vendas para os próximos meses ou ano. Dependendo da natureza dos produtos, muitas empresas desenvolvem as previsões para as famílias de produtos. Neste nível deve-se analisar a capacidade em atender a possível demanda e verificar questões como a necessidade de aquisições de novas máquinas.

Em um período menor, no horizonte a médio prazo, o planejamento mestre da produção deve ser definido, incluindo informações mais detalhadas das etapas de programação como a definição de metas, atividades a serem executadas e alguns prazos para compra de matérias-primas.

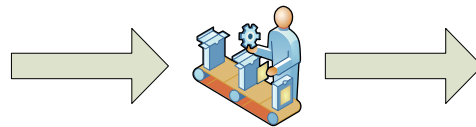
Por fim no horizonte curto de programação, onde todas as informações da demanda já devem estar definidas, é realizada a priorização das atividades e o sequenciamento de máquinas para obter um cronograma detalhado de operações. É nesta fase que são aplicadas as técnicas de otimização combinatória para a obtenção da melhor solução de acordo com um objetivo pré-estabelecido, como a minimização do tempo total de produção (*completion time* ou *makespan*) ou a minimização do número de atividades atrasadas em relação a sua data final de entrega [38].

A programação da produção consiste basicamente na alocação dos recursos da fábrica para a realização de determinado conjunto de tarefas em um período de tempo, porém o problema pode ter inúmeras formas e conjunto de restrições de acordo com o

segmento e processo produtivo da empresa. Pinedo [34] classifica os problemas nas seguintes categorias:

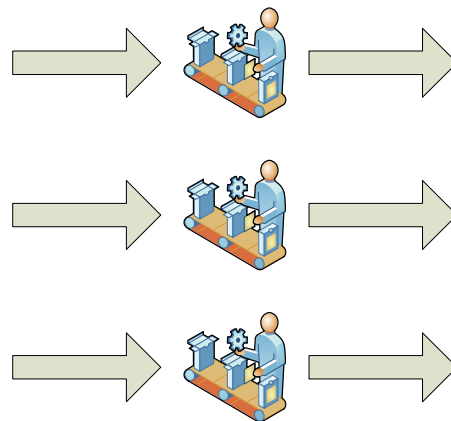
- **Máquina Única:** Instância mais simples do problema de sequenciamento de operações e consiste na ordenação das operações em apenas uma máquina.

Figura 1 – Modelo do problema de máquina única



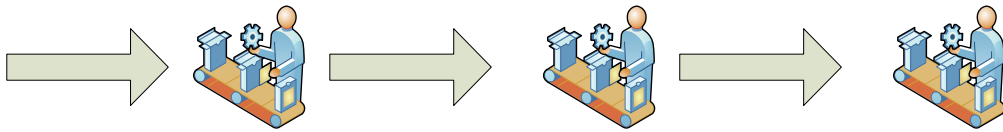
- **Máquinas em Paralelo:** Consiste em um conjunto de máquinas capazes de realizar a mesma operação, deve-se então ordenar e dividir um conjunto de operações entre as máquinas. Considera-se que a operação pode ser feita em qualquer uma das máquinas ou em um subconjunto qualquer e que as máquinas podem ter velocidades diferentes de processamento para a mesma operação.

Figura 2 – Modelo do problema de Máquinas em paralelo



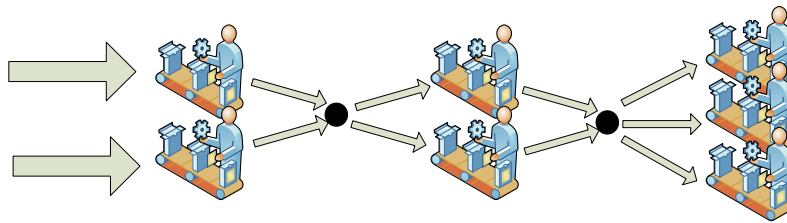
- **Flow Shop:** Neste problema existe uma linha de produção com várias máquinas em série e cada operação deve ser processada em todas as máquinas da linha, seguindo a mesma ordem.

Figura 3 – Modelo do problema para Flow Shop



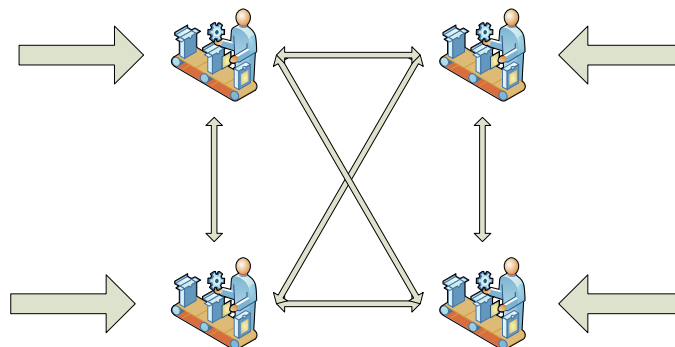
- **Flexible Flow Shop:** Semelhante ao anterior, porém em cada etapa da linha de produção em vez de existir apenas uma máquina, o sistema possui um conjunto de máquinas semelhantes em paralelo. Portanto cada operação deve passar por toda a linha de produção e em cada estágio deve ser processada em apenas uma das máquinas.

Figura 4 – Modelo do problema para Flexible Flow Shop



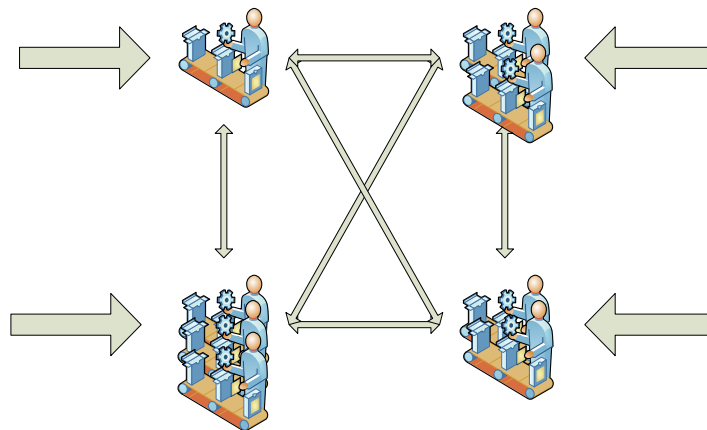
- **Job Shop:** Em ambientes assim, cada máquina é considerada como um centro de trabalho e cada tarefa possui roteiro próprio de fabricação, ou seja, cada produto não precisa passar necessariamente por todas as máquinas, nem mesmo seguir a mesma sequência dos outros.

Figura 5 – Modelo do problema para Job Shop



- **Flexible Job Shop:** Novamente este modelo é semelhante ao de cima, porém em vez de máquinas como centros de trabalhos têm-se vários conjuntos de máquinas semelhantes em paralelo como setores produtivos. Do mesmo modo cada produto deve seguir seu roteiro definido pelos setores e em cada um deve ser processado por apenas uma máquina.

Figura 6 – Modelo do problema para Flexible Job Shop



- **Open Shop:** Este modelo é o mais genérico de todos por não exigir um roteiro padrão para cada produto, o algoritmo de sequenciamento que irá definir a ordem em que a tarefa irá passar pelas máquinas.

Para todos estes modelos deve-se assumir um número finito de máquinas e operações, onde se denota o número de tarefas por n e o número de máquinas por m . Cada tarefa ou produto que deve ser processado possui data de liberação para fabricação (*release date*) que determinam o instante em que o mesmo já pode ser iniciado e também o prazo de término (*due date*) que informa o limite de tempo para que a fabricação seja finalizada sem penalizações.

Utilizando alguma ferramenta de cronoanálise, a empresa deve estimar também os tempos padrões de processamento de cada produto em cada máquina além do tempo de preparação ou limpeza dos equipamentos, mais conhecido como *setup*. Esses tempos são fundamentais para a execução do algoritmo de sequenciamento e devem estar sempre atualizados. Outros dados como prioridade de cada tarefa e disponibilidade de cada equipamento podem ser necessários.

Dentro de cada modelo de produção podem ainda existir outras restrições, a seguir são descritas algumas:

- a. **Restrição de precedência (*precedence constraint*):** uma peça deve esperar a finalização de outra para poder iniciar seu roteiro de trabalho. Ex: a montagem de uma mesa só pode começar após o término da produção dos pés da mesma.
- b. **Restrição de mão de obra (*workforce constraint*):** como algumas empresas tentam enxugar ao máximo o quadro de funcionários para redução de custos, alguns centros de trabalho funcionam alternadamente com outros efetuando o rodízio de funcionários, sendo assim a concorrência por recursos gera a restrição de que apenas um desses centros esteja trabalhando por vez.
- c. **Restrição de sequência (*routing constraint*):** As unidades de produção têm sequência definida, ou seja, tem que ser processada na ordem especificada.
- d. **Restrição de manuseio e locomoção (*material handling constraint*):** Para muitas indústrias o tempo necessário para organização do material dentro da célula de trabalho e a locomoção de um centro para outro deve ser considerado, gerando uma restrição entre o horário de término da unidade no centro precedente e horário de início do processo no centro subsequente.
- e. **Restrição de tempo de preparação (*sequence dependent setup times and costs*):** Alguns processos necessitam de um tempo de preparação na máquina, chamado de setup. Este tempo é condicionado pela ordem em que as unidades de produção passam pela máquina, ou seja, quanto menor for as diferenças entre duas peças consecutivas em uma mesma máquina, menor o tempo de setup.
- f. **Restrição sob demanda:** empresas têm diferentes pontos de vista quanto ao modo de produzir, dependendo do público alvo e tipo de produto, algumas produzem para manter em estoque uma quantidade suficiente para pronta entrega quando o pedido é efetuado (*make to stock*), já para outros casos o produto só é feito após o pedido ser realizado (*make to order*). Estas decisões tem um grande impacto no sequenciamento de atividades, já que aqueles produtos que já possuem

pedidos têm datas limites (*due date*) mais restritas e devem ser mantidas para não haver prejuízos com atrasos de entrega.

- g. **Interrupções (*preemptions*):** Parar uma operação no meio do processo pode ser impraticável por representar geralmente perda de tempo devido ao transtorno gerado, mas às vezes pode ser útil, como por exemplo, para não atrasar um lote inteiro por causa de apenas uma peça que estragou.

2.1.1 Propósitos da Programação

Existem várias razões para uma empresa fazer a programação da produção através das técnicas de sequenciamento. Em um primeiro momento tem-se de forma direta a otimização dos recursos, cumprimento de prazos e possibilidades de aumento de produção e qualidade dos produtos, pois estes aspectos são inerentes às técnicas; mas além desses, pode-se ressaltar mais alguns propósitos, relacionados à organização e controle da produção [3]:

- Verificação da capacidade produtiva: o planejamento dirá se a empresa tem capacidade para produzir a demanda necessária de forma mais precisa e ajuda na alocação de recursos em um nível mais alto;
- Auxilia na tomada de decisão para planejamentos da fábrica: outros departamentos da empresa, clientes e fornecedores poderão se planejar melhor evitando conflitos de recursos e de capacidade, a programação pode servir de interface entre todos os envolvidos da cadeia produtiva [21];

2.2 FUNDAMENTOS DA MELHORIA CONTÍNUA E CICLO PDCA

As práticas de melhoria contínua tem sido importantes para que as empresas tenham um crescimento sustentável onde todas as áreas acompanhem a evolução do todo.

Para Merli [29] a melhoria contínua ou abordagem Kaizen (termo japonês que denota um processo de qualidade total nas empresas) supõe que: “as melhorias individuais nas várias atividades irá assegurar a melhoria do processo como um todo. Essa abordagem quando aplicada sistematicamente, garante que todos os processos da companhia melhorem continuamente em termos de produtividade, custo e conformidade”.

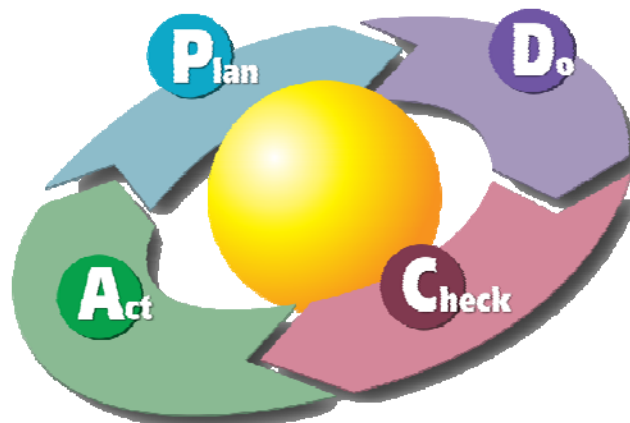
Já Bessant et al. [6] define melhoria contínua como o processo que abrange toda a empresa focado em melhorias incrementais. Por sua vez, Slack et al. [] definem melhoria contínua como uma abordagem de melhoramento de desempenho que presume mais e menores passos de melhoramento incremental.

Segundo Gerolamo [17] os pequenos melhoramentos citados pelos outros autores têm uma vantagem significativa sobre os grandes, pois podem ser seguidos de uma forma relativamente “indolor” por outros pequenos melhoramentos. No melhoramento contínuo não é o tamanho de cada passo que é importante, e sim a probabilidade de que o melhoramento vai continuar.

O gerenciamento da melhoria contínua pode ser realizado através de um conjunto de ações cíclicas de acompanhamento das ações de melhoria, é o famoso ciclo PDCA. Para Campos [10] o ciclo PDCA para controle do processo de melhoria é um método gerencial composto de quatro fases:

- **Planejar (*Plan*)** – estabelecer metas sobre os itens de controle e estabelecer a maneira (caminho, método) para atingi-las;
- **Executar/desempenhar (*Do*)** – execução das tarefas como prevista no plano e coleta de dados para verificação do processo, além do treinamento decorrente da fase de planejamento;
- **Verificar (*Check*)** – a partir dos dados coletados na execução, compara-se o resultado alcançado com a meta planejada;
- **Atuar corretivamente (*Action*)** – etapa onde o usuário detectou desvios e atuará no sentido de fazer correções definitivas, de forma que o problema nunca volte a ocorrer.

Figura 7 – Ciclo PDCA



O ciclo PDCA é sempre mostrado como um círculo para indicar a natureza contínua da melhoria. Todos os tipos de melhoria e manutenção da melhoria requerem a realimentação da melhoria. Por fim, o PDCA é um método para tratar de todos os tamanhos de problemas, desde melhorias incrementais até as mais radicais [37].

Como descrito anteriormente a programação da produção é um processo decisório, ou seja, para a aplicação do conceito de melhoria contínua durante o processo de sequenciamento de operações se deve considerar que as ações de melhoria envolverão mudanças nas regras e parâmetros que norteiam as técnicas de sequenciamento.

2.3 TÉCNICAS DE SEQUENCIAMENTO

As técnicas desenvolvidas até hoje surgiram das mais variadas áreas da computação, por se tratar de um problema de otimização combinatória, já se propuseram a resolver com métodos matemáticos, heurísticas, redes neurais, algoritmos genéticos e outros ramos da inteligência artificial.

Por meio de métodos exatos, a onde o objetivo é encontrar a solução ótima, porém exigem um elevado esforço computacional, e métodos de aproximação, que não garantem a solução ideal, mas são capazes de encontrar boas soluções em tempo computacional aceitável (BLUM e ROLI, 2003; AGUIRRE, 2007)[] [].

2.3.1 Métodos Exatos

Para garantir que a solução ótima seja encontrada, os métodos exatos precisam “varrer” todo o universo de soluções possíveis, tornando-os assim computacionalmente inviáveis para casos reais com um grande número de variáveis, uma vez que o problema em questão cresce exponencialmente à medida que se aumenta o número de tarefas e máquinas.

Sendo assim esses métodos geralmente são utilizados para demonstração em problemas de pequeno porte e para resolução de subproblemas menores dentro de soluções com outros algoritmos combinados.

2.3.1.1 Branch and bound

A técnica mais popular desta categoria é chamada de *Branch and Bound*. Ela utiliza uma estrutura dinâmica de árvore em que os nós folha representam as várias soluções possíveis para o sequenciamento. A busca pela solução ótima começa de um nó raiz que é expandido a cada iteração, aumentando a amplitude da busca. O próximo nó a ser expandido depende da técnica usada.

Atribuindo valores aos nós é possível escolher entre o mais apropriado para a expansão. Há técnicas em que apenas o valor do custo é atribuído ao nó. O nó com menor custo é escolhido para ser expandido. Outras ainda atribuem um valor de custo do nó e uma estimativa de custo para atingir um nó folha. O melhor nó é escolhido para expansão.

2.3.2 Regras de Despacho

Este método não é um algoritmo otimizador, apenas define um critério de priorização e ordena as tarefas para montar a solução. Entretanto, por ser de fácil implementação é amplamente utilizado nas equipes de planejamento da produção, porém não apresenta bons resultados se comparado aos outros métodos. Tais resultados não são bons, pois o critério adotado ignora quaisquer outras possíveis alternativas que no final deixariam a ordem das atividades mais eficiente. Algumas das regras para sequenciamento de ordens são:

- a. **Menor data de entrega** – através desta regra as tarefas que tiverem a menor data limite (*due date*) serão feitas primeiro. O objetivo é obter o menor atraso de ordens possível.
- b. **Menor tempo de processamento** – as tarefas que têm o menor tempo de processamento são feitas primeiro, o objetivo é aumentar o fluxo de materiais (*throughput*) e diminuir o estoque em processo (*work in process*), porém pode atrasar unidades de grande processamento;
- c. **Maior tempo de processamento** – as tarefas que têm o maior tempo de processamento são feitas primeiro, o objetivo é evitar que grandes lotes, geralmente mais importantes fiquem esperando, porém pode gerar mais estoque em processo;
- d. **FIFO** (*first in, first out*) – o primeiro a chegar é o primeiro a sair. Esta é a regra mais utilizada em todo o setor, geralmente a produção segue a ordem de chegada, apesar de evitar que unidades de produção fiquem

esperando muito tempo a regra não considera nem tempo e a melhor ordem para execução das atividades o que gera um sequenciamento não muito bom;

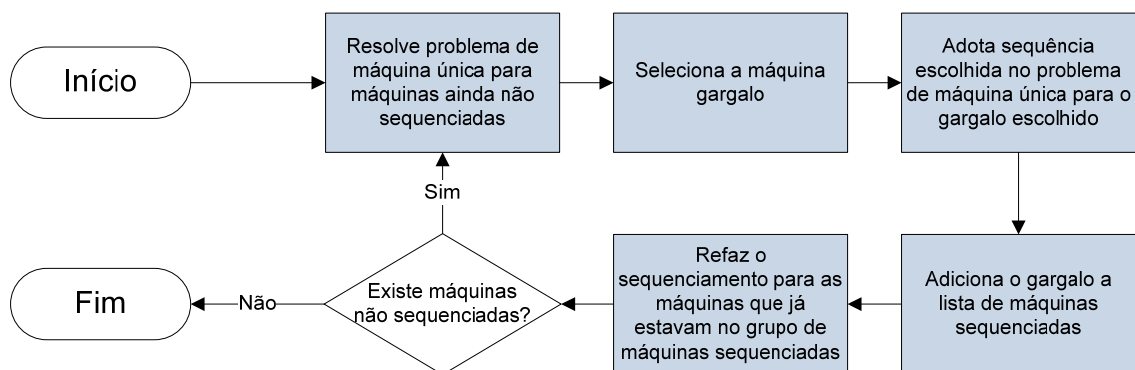
- e. **Menor folga** - esta regra tenta combinar o tempo de processamento e a data de entrega como parâmetro, ou seja, as tarefas que tiverem a menor diferença entre o tempo de finalização estimado e a data limite (*due date*) serão feitas primeiro, o objetivo como na primeira regra é ter o menor atraso de ordens possível, porém apresenta-se um pouco mais eficiente;

2.3.3 Shifting Bottleneck

Proposto por Adams (1988)[1], o algoritmo de Shifting bottleneck (adiamento de ponto crítico) é uma heurística bem conceituada para a resolução dos problemas do tipo *job shop*. A técnica aplicada neste algoritmo diz que ao otimizar a utilização dos recursos críticos do sistema, ou seja, as máquinas gargalos, todo o sistema será otimizado.

A técnica consiste em sequenciar as máquinas várias vezes, sempre se focando em melhorar o sequenciamento da máquina gargalo. Geralmente é utilizado combinado a outro método para resolver problemas de máquinas únicas após o passo de seleção de qual máquina é crítica ao sistema. A figura a seguir demonstra o funcionamento do algoritmo.

Figura 8 – Fluxograma ilustrando funcionamento do algoritmo *Shifting Bottleneck*



2.3.4 Redes Neurais

Redes Neurais artificiais são estruturas computacionais baseadas na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência. Elas procuram solucionar problemas através de simulações do cérebro humano, inclusive em seu comportamento, ou seja, aprendendo, errando e fazendo descobertas.

As redes neurais são constituídas de nós ou unidades de processamento. Em cada unidade pode haver memória local e ligações para outras unidades, nas quais recebem e enviam sinais. Essas unidades são a simulação de neurônios, recebendo e retransmitindo informações através dos sinais sinápticos.

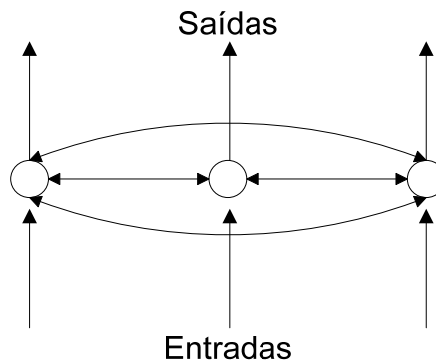
Segundo Akyol e Bayhan [2], as vantagens da utilização de redes neurais para a resolução de problemas de sequenciamento estão na natureza do método que permite a visualização da relação entre a entrada e saída do algoritmo, ou seja, através dos pesos e fatores atribuídos aos nós e conexões da rede é possível deduzir a influência de cada entrada na solução gerada. Outra grande vantagem é que redes neurais após o processo de aprendizagem possuem menores tempos de processamento para gerar novas soluções o que sugere uma capacidade maior de simulação.

Inúmeros trabalhos vêm sendo desenvolvidos com a utilização de redes neurais, principalmente pela facilidade de combinação do método com outras técnicas, as redes podem ser utilizadas em conjunto com métodos heurísticos para encontrar melhores soluções ou simplesmente acelerar o processo de convergência dos mesmos.

Exemplos de algumas das redes mais utilizadas para resolução deste tipo de problema:

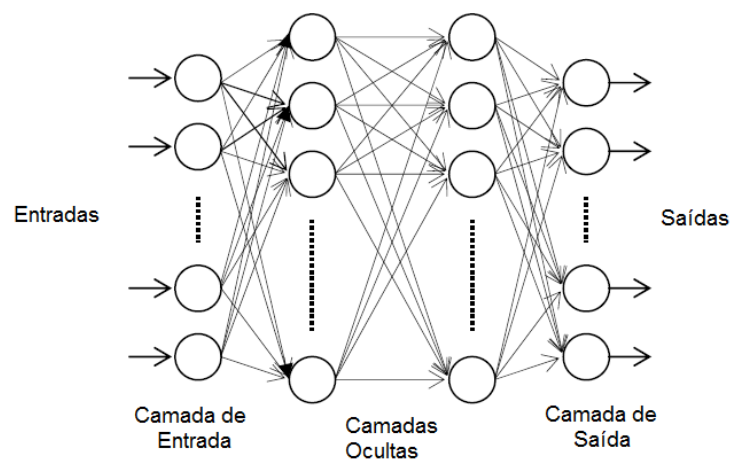
- **Redes *Hopfield*:** Propostas por Hopfield [22], as redes desta categoria possuem conexões multidirecionais entre todos os nós, desaparecendo assim a ideia de camadas bem distintas como nas outras redes. Redes deste tipo têm a facilidade de implementação em paralelismo como vantagem, porém a lista de desvantagens é grande quando aplicada a problemas de sequenciamento, já que facilmente a rede converge para um ótimo local e estabiliza, não garantindo achar soluções ótimas. Além disso, para que a rede funcione é necessária a “tradução” do problema para uma função energia que guiará o processo de convergência, e isso pode ser extremamente difícil na maioria dos casos para a programação da produção.

Figura 9 – Topologia modelo para redes neurais de Hopfield



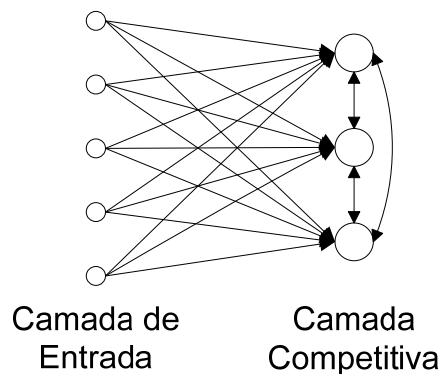
- Perceptron Multicamadas:** Neste modelo, os neurônios são organizados em uma camada de entrada, uma ou mais camadas intermediárias e por fim uma camada de saída. Os pesos das conexões são ajustados a fim de se atingir a eficiência sináptica através do método de aprendizado *backpropagation*. Por apresentar uma grande capacidade de generalização esta rede pode se apresentar em diversas formas, com um número variado de camadas; porém dependendo da configuração pode não apresentar bons resultados quanto ao tempo de processamento e qualidade da solução. Essa sensibilidade aos parâmetros de controle da rede faz com que ela não seja muito recomendada para problemas de otimização combinatória.

Figura 10 – Topologia modelo para Perceptron Multicamadas



- **Redes Neurais Competitivas:** Redes deste modelo apresentam uma característica bem peculiar pela utilização do lema *winner take all* onde os neurônios disputam entre si para ser aceito como resposta da rede. Geralmente são utilizadas para reconhecimento de padrões e classificação de elementos dentro de um domínio e infelizmente não pode ser aplicado a todos os tipos de problema em questão.

Figura 11 – Topologia modelo para redes neurais competitivas



2.3.5 Buscas Locais

Técnicas de buscas locais se diferenciam por refinar de forma exata uma solução encontrada por uma heurística como o Shifting Bottleneck ou alguma regra de despacho. O método heurístico explora o espaço de busca procurando regiões promissoras através de alguma regra, a busca local explora essas regiões procurando pontos ótimos. Sendo assim as buscas locais podem ser consideradas como um meio termo entre os métodos exatos que são inviáveis computacionalmente e métodos heurísticos que nem sempre chegam a boas soluções.

Um grande problema enfrentado por estes métodos é que a melhor solução de uma região, chamada de ótimo local, nem sempre é a melhor solução para o problema (ótimo global).

2.3.5.1 Greedy randomised adaptive search procedure (GRASP)

Geralmente utilizado com alguma regra de despacho, o algoritmo GRASP consiste em um método iterativo probabilístico, onde a cada iteração é obtida uma solução do problema em estudo. Cada iteração contém duas fases, uma construtiva, que determina a solução que será submetida à busca local (de forma gulosa), outra iterativa que tenta obter

alguma melhoria na solução corrente, ou seja, através de uma solução original que pode ser gerada por alguma regra de despacho, esta técnica efetua pequenas modificações iterativamente até se chegar a uma solução ótima local, ou seja, qualquer outra pequena alteração feita não traz nenhuma solução melhor que esta.

O algoritmo ainda possui uma componente probabilística, em vista da escolha aleatória na lista de candidatos (em um guloso simples seria selecionado o primeiro elemento da lista). Esta técnica de escolha permite que diferentes soluções sejam geradas a cada iteração GRASP. O critério de parada mais usual é o máximo de iterações ou tempo de execução.

2.3.5.2 Busca tabu

A Busca Tabu consiste basicamente em uma técnica de melhoria de solução, que considera estruturas que permitam explorar eficientemente o histórico de todo o processo de busca. Ela tem como característica básica o fato de ser um método genérico que pode usar um tipo de heurística a cada passo e tendo como objetivo, escapar das armadilhas dos ótimos locais ainda distantes de um ótimo global.

O algoritmo evita movimentos na vizinhança que parece conter soluções que duplicariam acontecimentos anteriores. Porém um grau de esquecimento estratégico é atribuído a esse algoritmo através de uma memória capaz de armazenar os últimos t movimentos. Esta memória tem seu tamanho variável de acordo com o desejo de se explorar o espaço de busca.

Estratégias intermediárias com memória média são baseadas em modificar as regras de escolha para diminuir escolha de soluções historicamente boas em regiões atrativas e intensificar a busca em outras regiões. Já a memória mais longa diversifica a busca em áreas ainda não exploradas [18].

2.3.5.3 Algoritmos genéticos

Algoritmos genéticos são inspirados pela biologia evolutiva relacionada à teoria da evolução das espécies de Darwin, onde se acredita que uma população de indivíduos carrega em seu código genético características pessoais que são passadas de geração para geração, porém não de forma idêntica, a cada novo indivíduo formado seu código genético pode sofrer pequenas mutações além da combinação de traços de seus ancestrais. Aplicando a

esta população um critério de seleção é natural que os mais fortes sobrevivam e que o material genético da geração seguinte seja melhor que a primeira.

Computacionalmente falando, a evolução geralmente se inicia a partir de um conjunto de soluções criado aleatoriamente e a cada geração, a adaptação de cada solução na população é avaliada, alguns indivíduos são selecionados para a próxima geração, e recombinados ou mutados para formar uma nova população. A nova população então é utilizada como entrada para a próxima iteração do algoritmo.

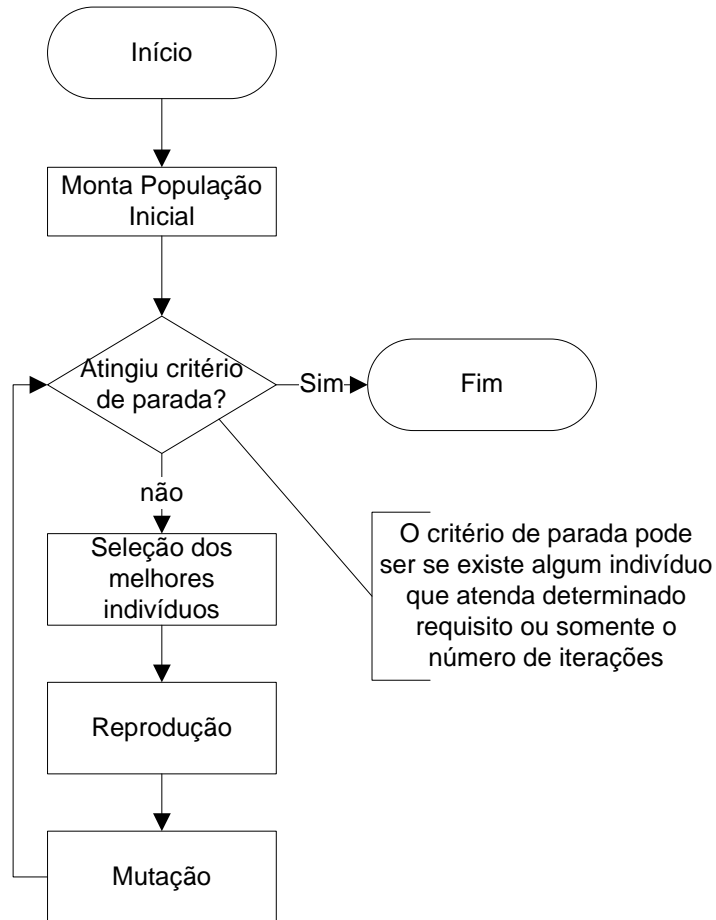
Apesar de sofrer alterações aleatórias, os algoritmos genéticos não são processos não direcionados, pois exploram informações históricas para encontrar novos pontos de busca onde são esperados melhores desempenhos. Isto é feito através de processos iterativos, onde cada iteração é chamada de nova geração.

O código genético de um indivíduo deve ser uma representação do espaço de busca do problema a ser resolvido. Ele deve ser uma representação capaz de representar todo o conjunto dos valores no espaço de busca, e precisa ter tamanho finito. Muitos autores já propuseram diversas formas de representação de um cromossomo para o problema de sequenciamento, algumas de forma direta onde os elementos representam as operações a serem realizadas e outras de forma indireta na qual os elementos representam as regras a serem seguidas pelo sequenciamento.

Durante a fase de seleção são escolhidos os melhores indivíduos de acordo com a função-objetivo. Devem ser escolhidos também alguns indivíduos aleatoriamente para que se obtenham como pais os mais bem adaptados, sem deixar de lado a diversidade dos menos adaptados. Essa técnica minimiza também o problema de ficar preso em ótimos locais.

A reprodução, tradicionalmente, é dividida em três etapas: acasalamento, recombinação e mutação. O acasalamento é a escolha de dois indivíduos para se reproduzirem. A recombinação, ou *crossing-over* é um processo que imita o processo biológico homônimo na reprodução sexuada: os descendentes recebem em seu código genético parte do código genético do pai e parte do código da mãe. Esta recombinação garante que os melhores indivíduos sejam capazes de trocar entre si informações que os levem a uma maior possibilidade de sobreviver, gerando assim, descendentes ainda mais fortes. As mutações, por sua vez, têm como objetivo permitir maior variabilidade genética na população, impedindo que a busca fique estagnada em um mínimo local [19].

Logo abaixo é demonstrado um fluxograma com a estrutura básica de um algoritmo genético.

Figura 12 – Estrutura básica do algoritmo genético

2.4 APLICAÇÃO DOS ALGORITMOS DE SEQUENCIAMENTO EM UM AMBIENTE REAL

Apesar da existência de todas as técnicas listadas na seção anterior muito pouco se tem aplicado nas indústrias. Dentre as causas dessa ausência pode-se citar: a falta de ferramentas comerciais que implementem esses algoritmos de forma prática; a falta de maturidade das empresas quanto ao processo de planejamento da produção; mas principalmente há uma grande dificuldade em se definir as restrições e manter os dados de parametrização atualizados para utilização das técnicas.

Com a crescente necessidade e aquisição de sistemas ERP (*Enterprise Resources Planning*) já é possível integrar de forma automática as informações entre diferentes departamentos de uma empresa, assim o PPCP consegue de forma confiável as informações necessárias para montagem de um bom plano mestre de produção (*Master Production Schedule*) através dos prazos de entrega de pedidos e previsão de chegadas dos materiais de fornecedores. Porém quando se trata do horizonte curto de planejamento a maioria das empresas ainda se limita as tradicionais técnicas derivadas de sistemas MRPII

(*Manufacturing Resources Planning*) onde a programação é feita através do famoso “Carga de Máquina”, no qual é realizado apenas um balanceamento entre necessidade e capacidade de produção para definir datas e prazos entre as etapas de produção. Neste processo detalhes como a sequência das operações e tempos de setups não são analisados o que pode dificultar simulações e melhorias no processo.

Uma programação detalhada também exige um controle e acompanhamento detalhado, por isso para a aplicação das técnicas de sequenciamento é recomendável formas de acompanhamento na fábrica em tempo real para garantir que o cronograma seja executado satisfatoriamente e reagir de forma rápida a imprevistos. Sistemas MES (*Manufacturing Execution System*) se propõem a realizar este acompanhamento muitas vezes com a utilização de terminais de coleta como microcomputadores e CLPs (Controlador Lógico Programável). A implantação de sistemas dessa categoria pode representar um grande investimento e por isso não são acessíveis a empresas de qualquer porte.

Além de todos estes problemas, as empresas que se arriscam a implantar as técnicas de sequenciamento ainda têm que investir grande esforço para manter atualizados os parâmetros do sistema para que ele continue gerando boas soluções de acordo com a realidade da empresa. Este esforço é devido a vários fatores como:

- **Introdução de novos produtos:** Constantemente a empresa necessita adicionar novos produtos a sua linha de produção para atender demandas do mercado. Muitas vezes esses produtos geram certa insegurança durante o planejamento já que muitas informações do processo de fabricação ainda não são conhecidas. Dependendo da situação pode se buscar semelhança entre outros produtos já fabricados para realizar a estimativa de tempos, porém geralmente uma margem de segurança maior é aplicada ao prazo de fabricação.
- **Aquisição ou mudança de equipamentos:** Inovações tecnológicas muitas vezes requerem um replanejamento total das informações. A mudança do parque de máquinas, por exemplo, traz um impacto muito grande, pois pode interferir diretamente sobre a definição do gargalo da produção como gerar novos roteiros de fabricação para os produtos.
- **Mudanças nos processos:** Melhorias no processo também implicam em novos parâmetros e novas restrições para o problema de sequenciamento.

- **Rotatividade de pessoal:** A mudança de funcionários influencia diretamente na produtividade do setor, já que provavelmente o novo funcionário levará certo tempo até chegar à prática do antigo.

Todos esses eventos citados acima ocorrem com certa frequência na maioria das indústrias, por isso há a necessidade de atualização constante dos tempos padrões e demais parâmetros utilizados no sequenciamento de operações, para que ele gere soluções compatíveis com a realidade da empresa, pois para obter os ótimos resultados da solução gerada pelo sistema, deve ser possível a correta execução do planejamento com a atual situação dos recursos fabris.

O sequenciamento das operações gerado durante a fase de planejamento é chamado de programação preditiva, pois é o que se espera ocorrer caso os parâmetros utilizados estejam em conformidade com o ambiente fabril, porém é fato que durante a execução do planejamento a empresa ainda está sujeita as ocorrências inesperadas e imprevisíveis que podem impactar consideravelmente a programação como era prevista. Esses problemas se devem a característica dinâmica do ambiente fabril e dificilmente consegue-se evitá-los.

Dentre as causas que geram essas rupturas no planejamento se pode citar: atividades que duram mais ou menos tempo que o previsto; recursos podem ficar indisponíveis; o fornecedor pode atrasar a entrega da matéria-prima; prazos de entrega podem mudar de acordo com a pressão de clientes ou estratégias da gerência; retrabalhos podem ser incorporados para arrumar falhas no produto; dependendo do segmento até alterações no tempo podem trazer impactos na produção [21].

Diante de tantas possibilidades Aytug et al. [3] propôs um padrão de nomenclatura para facilitar o estudo das incertezas que ocorrem durante a execução do planejamento afetando a programação. A proposta analisa os eventos em três aspectos:

- **Causa:** Deve ser vista através do objeto (material, processo, recurso) e estado (pronto, não pronto, quebrado, alta qualidade, baixa qualidade);
- **Contexto:** Refere-se ao ambiente fabril no momento de ocorrência do evento (normal, após manutenção ou atualização de recursos, pessoas em treinamento, turno);
- **Impacto:** Os resultados da ocorrência por sua vez podem ser categorizados por tempo (encurtou ou prolongou o processamento? adiantou ou atrasou o início?), material (afetou a disponibilidade de

algum material necessário?), qualidade, dependência (afeta outras atividades?) e contexto (está relacionada ou não com o contexto mencionado?);

A utilização desta taxonomia possibilitaria a análise comparativa entre diferentes métodos que tratam dessas rupturas do planejamento e assim medir a abrangência de cada método, contudo Aytug et al. [3] ainda aborda um quarto aspecto referente as ações tomadas após a detecção do evento, que deve classificar os métodos de acordo com as regras utilizadas para refazer o sequenciamento original ou corrigi-lo de acordo com a nova situação.

De acordo com Aytug et al (2005), Herroelen e Leus [21] e Bidot et al. [7] os métodos que consideram esta dinamicidade do ambiente real e através de heurísticas que tentam prever as rupturas do sequenciamento original ou até mesmo propor novas alternativas à medida que estes eventos são detectados podem ser classificados em três famílias: abordagem proativa, reativa e progressiva.

2.4.1 Abordagem Proativa

Semelhante ao processo humano de aprendizado e melhoria, os métodos desta classe se utilizam de heurísticas e uma base de conhecimento para prever os eventos que podem ocorrer durante a execução da programação e com isso gerar um sequenciamento preditivo cada vez mais confiável e menos passível de rupturas.

Tais métodos mantêm a ideia clássica de construir uma solução global a cada ciclo do horizonte curto de programação e que ela deve ser boa o suficiente para não precisar ser reconsiderada o tempo de execução [7].

Dentro desta abordagem podem-se encontrar três estratégias distintas:

- Gerar uma solução preditiva que é julgada ser a melhor para a maioria dos casos, ou seja, pequenos desvios não prejudicarão ou deixarão a solução obsoleta;
- Gerar uma solução **flexível**² onde algumas decisões são deixadas para o momento da execução, assim os desvios previstos não fogem à programação preditiva;

² Uma programação flexível é uma programação incompleta onde decisões ainda devem ser feitas. Restrições podem ser associadas à indecisão para restringir o conjunto de soluções que podem ser derivadas da programação flexível.

- Gerar uma solução **condicional**³ onde vários cenários são elaborados para segmentos onde os desvios são previstos, assim durante a execução existem mais de um caminho para ser seguido sem quebrar a programação preditiva.

2.4.2 Abordagem Reativa

Nesta abordagem existe uma obrigatoriedade do sistema estar conectado em tempo real ao ambiente fabril, pois as decisões podem ser tomadas à medida que os eventos vão ocorrendo no chão de fábrica, ou seja, o sistema deve ser hábil o suficiente para coletar as informações, processá-las e retornar uma nova programação válida em tempo real.

Segundo Ouelhadj e Petrovic [33] para esta abordagem encontra-se dois tipos de estratégias:

- **Programação Completamente Reativa:** Nas técnicas puramente reativas não existe uma programação preditiva firmada, pois as decisões são feitas em tempo real durante a execução. Geralmente são utilizadas regras de despacho para selecionar a próxima tarefa a ser feita com maior prioridade dentre o conjunto de tarefas que estão aguardando o processamento no recurso.
- **Programação Preditivo-Reativa:** Talvez uma das estratégias mais utilizadas para sistemas onde há o tratamento de rupturas do sequenciamento em ambientes dinâmicos, a programação preditivo-reativa segue o padrão de sequenciamento normal com as técnicas já listadas e refaz o mesmo à medida que os eventos do chão de fábrica já não correspondem mais a programação preditiva firmada. O novo sequenciamento pode ser bem diferente do anterior, o que necessita certa cautela com outras atividades que estavam programadas de acordo com os prazos originais.

³ Uma programação condicional apresenta diferentes alternativas para parte das operações, assim durante a execução qualquer um dos caminhos pode ser escolhido.

2.4.3 Abordagem Progressiva

Também conhecida como programação contínua, esta abordagem utiliza as técnicas de sequenciamento para gerar uma programação preditiva em pequenos espaços de tempo já predefinidos, o objetivo é gerar o sequenciamento de forma on-line⁴ para curtos períodos onde as incertezas já foram resolvidas [7].

A ideia por trás desta abordagem é intercalar planejamento e execução, resolvendo o problema passo a passo através de janelas de tempo. A definição do tamanho desta janela pode influenciar no grau do processamento e probabilidade que eventos inesperados ocorram.

Existem ainda algumas técnicas que utilizam combinações destas abordagens formando métodos mistos com inúmeras possibilidades.

2.5 MEDIÇÃO DE DESEMPENHO DA PROGRAMAÇÃO

Para implementação das práticas que abordam melhoria contínua é necessário um controle do desempenho das medidas adotadas. A medição de desempenho pode ajudar a detectar: o que está acontecendo com o desempenho da empresa; quais as razões prováveis que configuram a situação atual; e quais as ações a serem tomadas [9].

Para Savolainen [36] a medição de desempenho é uma arma poderosa para alcançar os objetivos de melhoria contínua, e levando em conta o fato de que esse é um processo evolutivo, a medição de desempenho pode dar sustentação para o ciclo de aprendizado de melhoria contínua organizacional [1].

2.5.1 Quanto ao Resultado da Programação

Muitas empresas têm diferentes pontos de vista sobre o desempenho da programação da produção, existem diversos objetivos que podem ser adotados por cada uma, mas geralmente vão estar relacionados aos seguintes conceitos:

- Objetivos relacionados à utilização dos recursos: Empresas que procuram ocupar 100% do tempo produtivo de máquinas e funcionários

⁴ Em sistemas on-line a programação trabalha com informações do exato momento em que está sendo processada, as quais são obtidas através de sistema de coletas em tempo real.

geralmente estão preocupadas em manter um grande volume de produção.

- Objetivos relacionados à entrega das ordens dentro do prazo de entrega: Aplicam este objetivo as empresas que trabalham sob demanda e focam no atendimento ao cliente em primeiro plano, geralmente existem multas de atrasos estipulados em contrato e tentam atender todos os pedidos no prazo estipulado.
- Objetivos relacionados ao menor custo de produção: Para obter o menor custo de produção por unidade fabricada, as empresas tentam abaixar ao máximo o preço de venda. Para conseguir isto deve tirar vantagens do processo produtivo como menor tempo de *setup*, quantidade mínima de funcionários e turnos.

No contexto do problema de sequenciamento de operações, existe uma função que deve representar esses objetivos da empresa, ela é chamada de função *fitness*, muitas das técnicas a utilizam para avaliar as soluções geradas e compará-las com as demais. Nesta função pode-se estipular um ou mais objetivos de acordo com a necessidade da empresa.

Natural então que o desempenho de uma programação esteja fortemente relacionado com a função *fitness* escolhida. Por isso muitas ações que visam a melhoria de desempenho podem ser a alteração e melhoramento da função *fitness*.

2.5.1.1 Função fitness

Uma questão crucial em uma aplicação de sequenciamento de operações é como avaliar a qualidade da solução gerada, ou seja, quais os critérios (objetivos) serão levados em consideração para avaliar a solução.

Há três abordagens para tratar de problemas multiobjetivos: a abordagem convencional de fórmula ponderada, em que um problema multiobjetivos é transformado em um problema de objetivo único; abordagem lexicográfica; e a abordagem de Pareto [16].

- **Abordagem de fórmula ponderada:** Ocorre a transformação de um problema multiobjetivo em um único objetivo ao atribuir pesos numéricos a cada objetivo; e então combinar o valor desses critérios ponderados por meio de operações como adição ou multiplicação.

Essa abordagem possui a grande vantagem de ser fácil de usar, o que a torna uma das mais utilizadas nesse tipo de problemas. Porém existem implicações sobre os valores escolhidos como pesos, muitas vezes são definidos de forma intuitiva e as medidas utilizadas não são equivalentes [4].

- **Abordagem de Pareto:** A abordagem de Pareto utiliza o conceito de dominância de Pareto [11] onde não há uma combinação de diferentes critérios em uma única fórmula, todos os critérios são tratados separadamente, porém também apresenta problemas, e o principal deles é a dificuldade de escolher a melhor solução a ser utilizada na prática, uma vez que o resultado dessa abordagem não é uma única solução, mas sim um conjunto de soluções.

Outro problema da abordagem de Pareto é a dificuldade de lidar com diferentes níveis de prioridade, isto é, quando um objetivo é significativamente mais importante que outro.

- **Abordagem Lexicográfica:** Nesta abordagem não são atribuídos pesos aos critérios, mas prioridades a cada um dos objetivos e então focar na otimização dos objetivos de acordo com suas respectivas prioridades.

Basgalupp [4] exemplifica da seguinte forma: considere que x e y são soluções para o problema, e a e b dois critérios (objetivos) para avaliação. Além disso, considere também que a tem prioridade sobre b e que t_a e t_b são os limiares de tolerância associados com a e b respectivamente. A abordagem lexicográfica trabalha de acordo com a seguinte análise: se $|a_x - a_y| > t_a$ então é possível estabelecer uma escolha pelo melhor indivíduo considerando apenas o critério a . Caso contrário, a medida b deve ser avaliada. Caso $|b_x - b_y| > t_b$, então a melhor solução pode ser escolhida considerando o critério b . Se ainda assim as soluções continuarem empatadas, então se utiliza apenas o valor absoluto de a para indicar a melhor solução.

2.5.2 Quanto à Execução da Programação

Existem ainda indicadores de desempenho relacionados à relação entre a solução programada e a sua execução, estes indicadores são essenciais para o processo de

melhoria contínua do sistema em questão, por isso neste trabalho dá-se um destaque maior aos indicadores de flexibilidade, estabilidade e robustez da solução.

Estes indicadores são medidos em um contexto de operações exemplificado por Leon; Wu; Storer [24] como:

1. Uma solução preditiva inicial é montada pensando nos indicadores já mencionados. Esta programação então serve como base para todos os planejamentos da fábrica.
2. A solução então é colocada em prática e inevitavelmente ocorrerão eventos diferentes do planejado, os quais poderão requisitar uma reformulação da solução inicial, chamada de ruptura da solução.
3. Em resposta a estes eventos outra solução é montada ajustando-se a anterior deixando o planejamento novamente viável.
4. Esta nova solução é colocada em prática até que novo evento ocorra fazendo a ruptura da solução ou que o horizonte de tempo planejado se acabe.

2.5.2.1 Flexibilidade

A flexibilidade de uma solução diz respeito ao seu grau de liberdade em aceitar novos reajustes durante a fase de execução do planejamento. Para Herroelen e Leus [21] uma solução é dita flexível se ela é facilmente reparada para uma nova solução com a mesma qualidade.

Segundo Billaut et al. [8] a flexibilidade em uma programação pode assumir várias formas, entre elas:

- Flexibilidade temporal: quando existe uma flexibilidade sobre os tempos de início e duração das atividades. Algoritmos que possibilitam essa liberdade geralmente trabalham os tempos sempre no pior cenário adicionando margens de segurança para a programação;
- Flexibilidade na sequência de operação: quando é reservada para algumas atividades a possibilidade de ordenamento durante a execução da programação, implicitamente está relacionada com a flexibilidade temporal;
- Flexibilidade na alocação dos recursos: quando existe a possibilidade de alocar outros recursos para a execução da atividade, esta flexibilidade

pode ser de grande ajuda no caso de uma quebra de máquina, logo estará relacionada com a flexibilidade temporal e a flexibilidade na sequência de operação;

Billaut et al. [8] ainda relatam que bons resultados estão sendo obtidos na adição desta flexibilidade através de margens de segurança para atividades classificadas como críticas do processo, assim todo o sistema adquire certa imunidade aos eventos inesperados que prejudicam a programação inicial. Existe também uma preocupação na utilização destas técnicas para estimar qual o grau ideal de flexibilidade para o sistema.

2.5.2.2 Estabilidade

Diferentemente da flexibilidade, a estabilidade só pode ser medida após a execução das atividades, já que a mesma está relacionada ao quanto diferente foi a execução do planejamento.

Para Bidot et al. [7] uma programação é dita estável se as ações tomadas durante a execução estão próximas do planejamento no sequenciamento preditivo.

A estabilidade de uma solução pode ser medida através da somatória das diferenças entre o início planejado e o início real de cada atividade mais a diferença entre a sequência de atividades planejada e a ordem que foi realmente executada [33].

Logo nota-se que os dois indicadores mostrados até aqui estão diretamente ligados, já que quanto maior for a flexibilidade da programação preditiva maior deve ser a estabilidade somada ao fim da execução.

2.5.2.3 Robustez

Provavelmente um dos indicadores mais utilizados para sistemas de ambiente dinâmico, a robustez mede o que deve realmente importar para as empresas: a relação entre a qualidade da programação preditiva e a qualidade da execução no chão de fábrica. É válido lembrar que a qualidade da programação está relacionada aos objetivos utilizados na parametrização das técnicas conforme citados no início desta seção.

Já Billaut et al. [8] define como uma solução robusta aquela em que sua performance é bastante indiferente às incertezas relacionadas a sua execução.

A robustez pode ser calculada de diferentes formas, sempre estará relacionada à forma de como é calculada a qualidade de uma solução através da função fitness ou similar.

Importante ressaltar que os indicadores estão relacionados, mas nem sempre terão o mesmo resultado na solução já que uma programação pode ser flexível e estável, porém sem robustez, ou seja, a execução pode não ter desvios significativos na realização das tarefas e mesmo assim a qualidade medida ao fim do horizonte ser diferente da esperada. Por outro lado uma programação pode ser flexível e robusta, porém sem estabilidade, isso significa que apesar de todos os desvios que ocorreram durante a execução das atividades, a qualidade medida ao final do horizonte é semelhante à prevista [7].

2.6 MÉTODOS ADAPTATIVOS

Um sistema de programação adaptativo é definido por Bidot et al. [7] como qualquer sistema que esteja apto a gerar novas programações para a produção a medida que a solução preditiva não está sendo mais passível de execução. Portanto se pode assumir que sistemas adaptativos são ferramentas preparadas para o ambiente dinâmico encontrado na aplicação das técnicas de sequenciamento.

Se considerarmos o método adaptativo como um sistema que reage aos eventos inesperados durante a execução, então se tem que tanto a abordagem proativa quanto a abordagem reativa possuem esta característica de analisar os efeitos causados na programação para gerarem as novas programações. Não se inclui aqui a abordagem progressiva já que a mesma apresenta apenas uma técnica para elaborar soluções preditivas em um intervalo de tempo pequeno o suficiente para evitar os eventos inesperados.

Pode-se encontrar um bom exemplo de método adaptativo no trabalho de Mehta e Uzsoy [28] onde foi montado um sistema proativo/reactivo utilizando-se da estratégia de inserir tempos ociosos na programação para minimizar os efeitos de paradas de máquinas inesperadas. Com isso os autores conseguiram gerar soluções robustas no que se referem ao tempo de *lead time*⁵ dos produtos, o qual era o seu objetivo. Os autores ressaltam que a abordagem escolhida foi devido ao *lead time* dos produtos serem utilizados para definição do prazo de entrega para clientes.

⁵ Lead time é considerado o tempo de completude de uma tarefa, ou seja, o intervalo entre o início de sua primeira operação até o término da última.

Os resultados obtidos no trabalho de Mehta e Uzsoy [28] mostram que as soluções preditivas obtidas com a adição do tempo ocioso ao tempo de processamento das atividades e a utilização da técnica de sequenciamento *Shifting Bottleneck* tiveram desempenho semelhante ao trabalho realizado na prática mesmo com a ocorrência de paradas imprevistas. Para a estimativa do tempo ocioso a ser adicionado ao problema os autores utilizaram uma análise estatística de cenários ocorridos na fábrica em planejamento anteriores.

Trabalho semelhante foi proposto por Lambrechts; Demeulemeester; Herroelen [23] novamente utilizando as abordagens proativa e reativa para maximizar a estabilidade das soluções geradas. As estratégias utilizadas dão prioridade maior às operações com maior dependência e recursos com histórico maior de paradas imprevistas, assim essas operações ganham certa proteção quanto a indisponibilidades dos recursos necessários. Atividades com riscos maiores ganham também uma proteção ao tempo de processamento para dar uma margem de segurança.

Como ainda existe a possibilidade de alterações durante a execução da programação a deixarem não mais executável, o autor ainda prevê uma estratégia reativa utilizando o algoritmo de Busca Tabu para procurar uma nova programação que seja passível de execução e com o menor grau de alteração com a anterior visando a estabilidade do sistema.

Os resultados mostrados por Lambrechts; Demeulemeester; Herroelen [23] alcançam a marca surpreendente de melhoria de 96% de estabilidade com a utilização destas estratégias.

Para atingir todos os propósitos da programação da produção, conforme mostrado na seção 0 vê-se que com uma abordagem completamente reativa não se tem um plano para direcionar as outras atividades da fábrica, clientes e fornecedores já que as decisões são tomadas em tempo de execução. Assim pode-se concluir que para um sistema adaptativo ser completo deveria utilizar uma combinação entre abordagem proativa e abordagem reativa.

Nota-se também que o principal objetivo de um sistema adaptativo não é simplesmente melhorar a performance da programação e sim ter um planejamento confiável para servir como base para o planejamento de outras atividades, inclusive de clientes e fornecedores.

2.6.1 Arquitetura

O método para programação da produção de forma adaptativa vai muito além do que simplesmente uma técnica de sequenciamento de operações, ele necessita de todo um conjunto de aplicativos para fornecer as informações necessárias para que o processo de evolução dos parâmetros se dê de forma correta. Os possíveis sistemas cooperantes são:

- **Sistema de Gestão Integrado (ERP):** Existem diversas definições do que é um sistema ERP (*Enterprise Resources Planning*), mas nenhuma detalhada ou específica o suficiente para definir quais características deverão estar obrigatoriamente presentes para a caracterização de um sistema ERP, ou quais funcionalidades o mesmo deve atender para poder ser classificado como tal [5].

Para Mardegan et al. [27] o ERP é uma classe de sistemas de informação orientada para identificar e planejar todos os recursos da empresa necessários para atender aos pedidos dos clientes em termos de manufatura, distribuição e serviços. Eles se apresentam simplificada, como sendo uma ferramenta de tecnologia da informação para integrar os processos empresariais e as atividades dos vários departamentos, podendo também integrar todas as empresas da cadeia produtiva.

Tais sistemas, além de atuarem no planejamento, controlam e fornecem suporte a processos operacionais, produtivos, administrativos e comerciais da empresa. Todas as transações realizadas pela empresa devem ser registradas, para que as consultas extraídas do sistema possam refletir ao máximo possível sua realidade operacional.

Uma das grandes vantagens dos sistemas ERP é a consistência das informações, ou seja, o sistema acaba com as divergências entre dados relativos a um mesmo assunto fornecido por departamentos diferentes, a partir da utilização de um banco de dados central.

Segundo Davenport [13], os sistemas ERP fornecem suporte às atividades administrativas (finanças, recursos humanos, contabilidade e tributário), comerciais (pedidos, faturamento, logística e distribuição) e produtivas (projeto, manufatura, controle de estoques e custos), além de processos relacionados com a gestão da demanda.

- **Sistema de Coleta e Acompanhamento da Produção (MES):** O termo *Manufacturing Execution System*, foi criado em 1990 por Bruce Richardson da Advance Manufacturing Research [27], porém na literatura brasileira encontram-se várias traduções para ele.

Numa definição um tanto quanto ampla pode-se caracterizar MES como todo sistema de chão de fábrica orientado para melhoria de desempenho que complementa e aperfeiçoa os sistemas integrados de gestão (planejamento e controle) da produção [30] [12].

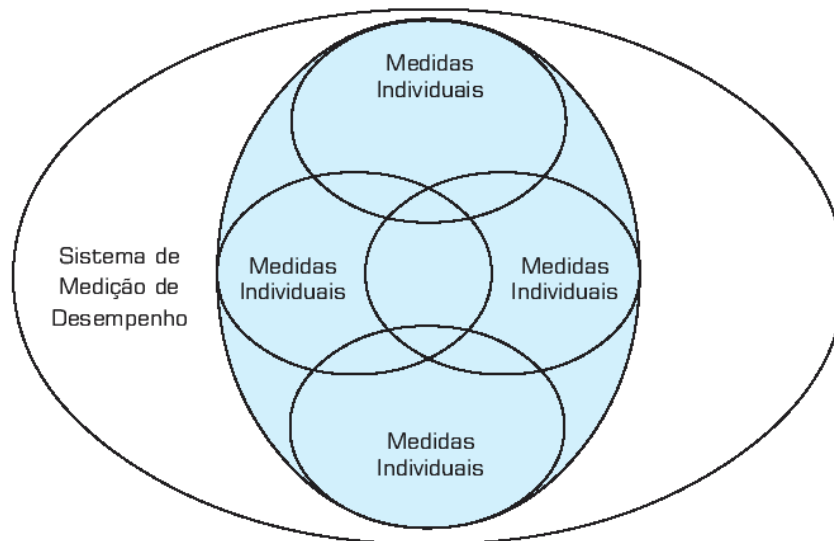
“Estes sistemas destinam-se a aumentar a agilidade dos sistemas de administração da manufatura que não seriam capazes de lidar com aspectos como o andamento de uma ordem de produção enquanto a mesma está em progresso e sujeita a restrições de capacidade variáveis em curto prazo. Isto é possível através da coleta e disponibilização das informações do chão de fábrica, fazendo a ligação entre o sistema de administração e o chão de fábrica” [40].

Independente de quão bom é o planejamento feito, a realidade nem sempre ocorre conforme o que foi planejado. Este *feedback* do chão de fábrica proporcionado pelo MES permite à empresa e outros sistemas uma comparação entre os dados obtidos durante a fase de planejamento e que realmente estão sendo executados [20]. Podendo com isso até modificar e adaptar as funções de planejamento às variações ocorridas na prática durante a produção.

- **Sistema de Medição de Desempenho e Melhoria Contínua:** O sistema de medição de desempenho (SMD) é um conjunto de processos e ferramentas para coletar e analisar dados capazes de apresentar informações sobre o desempenho de uma unidade organizacional de interesse (um grupo ou time de trabalho, um departamento, um processo, uma divisão, etc). Ele provê informações num conjunto focalizado de métricas, capazes de fornecer uma visão balanceada do desempenho da unidade organizacional de interesse, e permitir a tomada de decisão para melhorar os resultados [35].

Neely et al. [32] complementa que as medidas de desempenho devem ser analisadas inicialmente de forma individual e em seguida relacionadas em conjuntos par criar o Sistema de Medição de Desempenho.

Figura 13 – Visão Sistêmica da Medição de Desempenho (NEELY et al., 1995)



Já o Sistema de Melhoria Contínua (SMC) cria uma estrutura onde os dados coletados pela medição de desempenho possam ser analisados, visando gerar informação estratégica para que os decisores possam implementar ações de melhoria na empresa, ou seja gerencia as ações de melhoria para controle do ciclo PDCA e acompanha a coleta dos indicadores em relação aos objetivos da empresa para melhoria.

Sistema de Programação da Produção: Esta ferramenta representa o foco principal do presente trabalho, os também chamados de sistemas APS (*Advanced Planning and Scheduling*) consideram simultaneamente todos os recursos da organização, tanto produtivos como materiais. Baseados no conceito de programação por capacidade finita realizam uma programação de produção que considera a real disponibilidade de capacidade dos recursos produtivos ao longo do tempo, considerando praticamente todas as variáveis e restrições inerentes aos processos produtivos e buscando garantir uma programação viável mesmo em ambientes complexos e dinâmicos [40].

Sistemas de programação da produção com capacidade finita são definidos pelo DTI – Department of Trade and Industry [14] como aqueles sistemas baseados na simulação dos processos de manufatura. Eles têm como entrada basicamente a demanda e como saída um plano de produção de curto prazo. Como o modelo utilizado para a simulação é fiel às restrições da manufatura (daí provém o termo capacidade finita), o resultado é um plano de produção viável.

Indicados para tratar de problemas complexos de programação e sequenciamento os sistemas APS utilizam várias técnicas de sequenciamento que incorporam as restrições e as metas do negócio, sendo capazes de prover um planejamento e programação

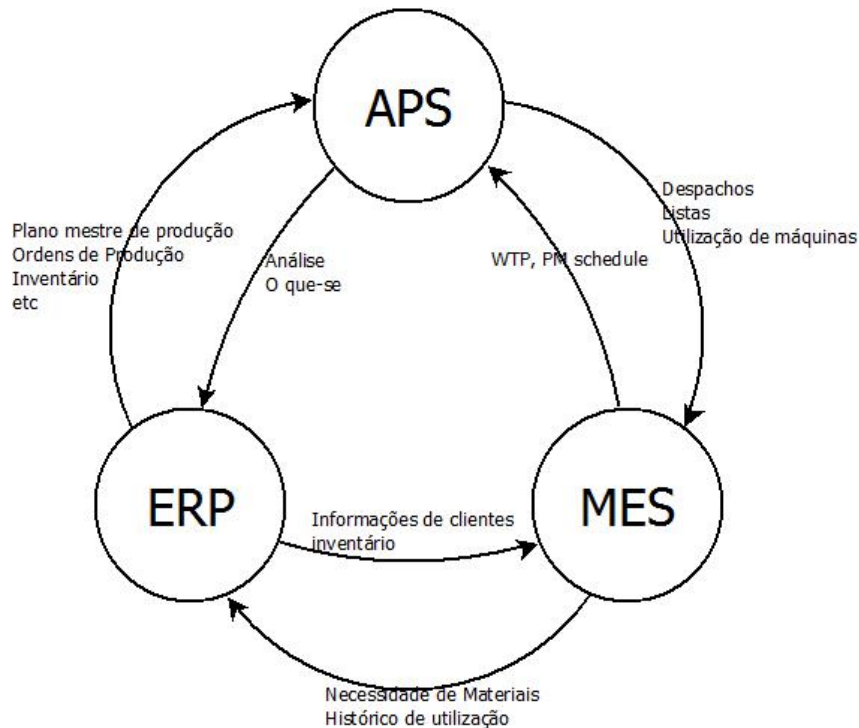
em tempo real, com rápida reformulação após novas mudanças e com capacidade de simular cenários diversos em poucos minutos, auxiliando nas decisões estratégicas em nível operacional em tempo real [40] [12]. A parametrização do sistema de programação é desenvolvida considerando as diferentes situações e variáveis inerentes ao negócio da empresa, e que devem ser consideradas para extrair do sistema produtivo o melhor resultado, dado o momento estratégico em que a empresa se encontra.

De acordo com Erhart [15], os sistemas APS realizam a programação e sequenciamento fino da produção através de discretização dos tempos de produção. Isso possibilita o carregamento das ordens de produção considerando a cada momento a disponibilidade dos recursos produtivos, observando a dependência entre as atividades e balanceando os centros de trabalho.

Entre os benefícios tangíveis e intangíveis de um sistema APS, pode-se destacar: aumento da capacidade aparente, redução da quantidade de produtos acabados, redução do WIP (*work in process*), melhoria no atendimento dos pedidos, minimização dos efeitos de reprogramações e dos imprevistos, melhor gerenciamento de compras de materiais e melhoria nas relações entre clientes e fornecedores. Além disso, melhora consideravelmente a capacidade de intervir no processo antecipadamente, ganhando segurança nas decisões rotineiras, gerando melhoria das relações internas da empresa, sobretudo entre as áreas de produção e vendas [39].

Um exemplo de integração destas ferramentas pode ser visto no trabalho de Liu et al. [25] onde os autores se utilizam da integração entre os sistemas ERP, MES e APS para montar um sistema de programação adaptativo.

Figura 14 – Ilustração do modelo de integração entre as ferramentas APS, MES e ERP por Liu et al [25]



No trabalho os autores realizaram a integração de dados em tempo real, ou seja, a todo o momento os dados da execução podem ser acompanhados, embora tenha sido estipulado um horizonte de planejamento de 6 horas para evitar muitos replanejamento que provocariam nervosismo e confusões [25].

Vale ressaltar que Liu et al [25] demonstra em seu trabalho as dificuldades técnicas encontradas para realizar este tipo de integração e que a implantação deste tipo de sistema deve ser sempre um processo contínuo de aperfeiçoamento das técnicas e que sempre novas informações podem ser consideradas.

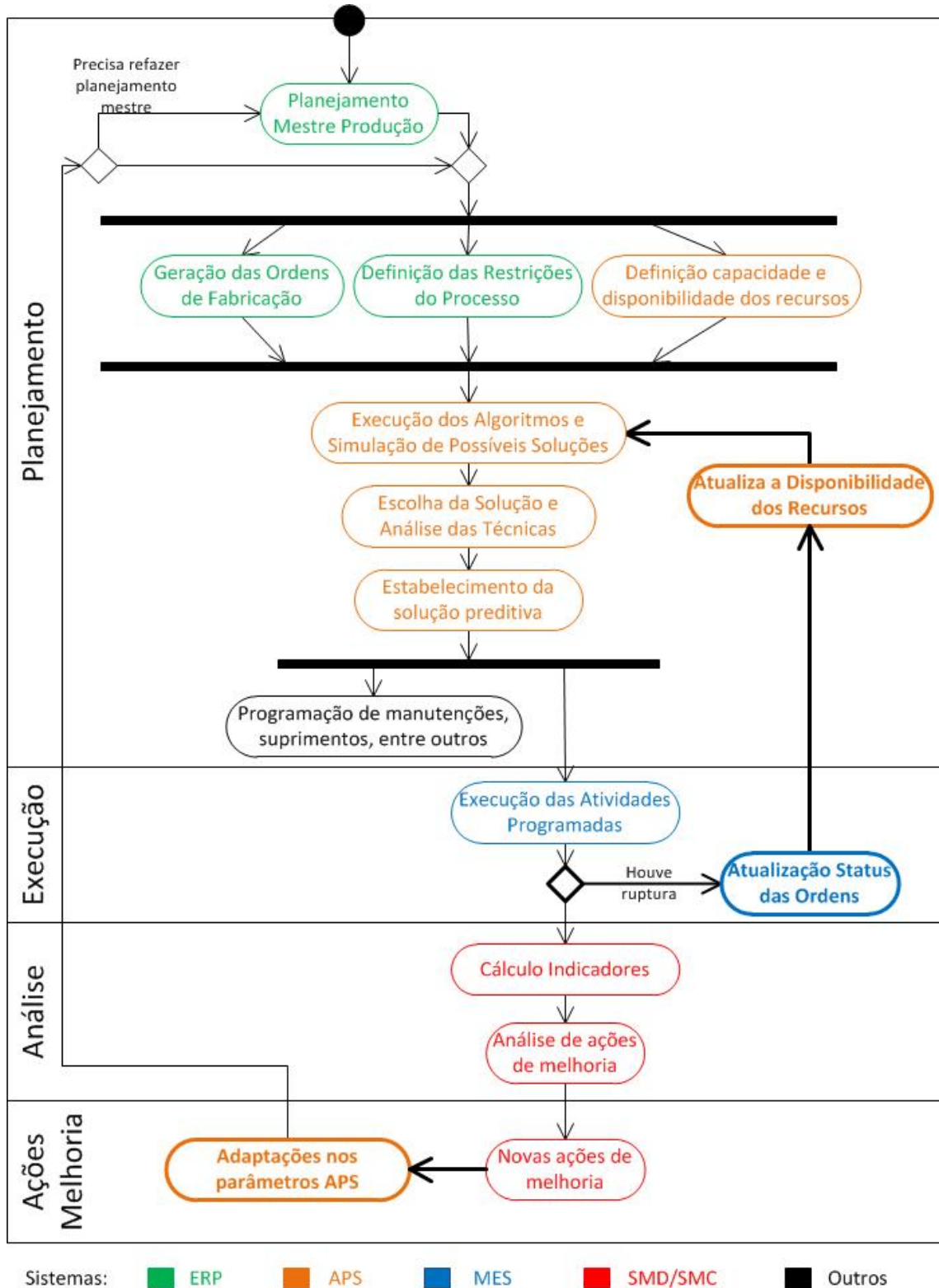
3 PROPOSTA DE UM MÉTODO DE PROGRAMAÇÃO ADAPTATIVO COM APOIO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO E MELHORIA CONTÍNUA

Como foi descrito por vários autores o processo de adaptação do sistema de programação preditiva pode utilizar inúmeras estratégias para deixar as soluções cada vez mais estáveis e robustas [28] [23]. Com este aumento na confiabilidade da programação preditiva, as evoluções no processo de planejamento podem trazer inúmeros benefícios às empresas com a otimização de seus recursos fabris.

Com isso os métodos adaptativos minimizam os impactos de eventos inesperados no chão de fábrica e proporcionam uma importância maior à programação da produção já que aumenta a possibilidade de melhorias em seu processo, permitindo que a empresa entre em um processo de melhoria semelhante ao descrito por Merli [29].

Assim, este trabalho desenvolveu um método de melhoria contínua da linha de produção, baseado em indicadores de desempenho que geram adaptações constantes no planejamento da produção conforme a dinâmica do ambiente. A proposta foi denominada MAP-Prod (Método Adaptativo de Programação da Produção) e apresentada na Figura 15. O método propõe integração dos sistemas ERP, APS, MES e SMD/SMC com atualizações constantes dos parâmetros empregados no sequenciamento pelo APS a partir dos indicadores colhidos pelo SMD/SMC.

Figura 15 – Método MAP-PROD “Método Adaptativo da Programação da Produção” (diagrama de atividade em UML de cada horizonte curto de planejamento)



Para auxiliar o gerenciamento deste processo e garantir uma melhor aderência do modelo à realidade da empresa, este trabalho propõe que todo o processo de melhoria do método de programação da produção seja acompanhado por um sistema de

medição de desempenho e melhoria contínua com o intuito de mensurar, adaptar as realidades momentâneas (aplicar o método adaptativo) e rastrear as ações de melhoria (adaptações no modelo) que ocorrem durante os ciclos de produção.

O MAP-Prod emprega vários tipos de sistemas, os quais podem ser encontrados no mercado com diversos nomes e siglas, estes sistemas são classificados na literatura de acordo com o conjunto de funcionalidades definidas como padrão para cada categoria. Neste trabalho propõe-se o incremento de algumas funcionalidades que estão em destaque na figura 15, tal como a identificação e atualização de ordens durante uma ruptura para o sistema MES, a atualização da situação dos recursos em tempo real e atualização dos parâmetros a cada ciclo de melhoria no sistema APS, estas funcionalidades podem ser desenvolvidas internamente no produto ou através de interfaces de integração.

O MAP-Prod é dividido em 4 fases: Planejamento, Execução, Análise e Ações de melhoria no texto a seguir foi desdobrado cada uma das fases para melhor entendimento do processo.

3.1 FASE DO PLANEJAMENTO

Durante esta fase são realizados todos os níveis de planejamentos e definições dos parâmetros do processo de fabricação conforme as atividades a seguir:

3.1.1 Planejamento Mestre da Produção

O Planejamento Mestre da Produção ou PMP (*Master Production Schedule – MPS*) é uma técnica com informações de um horizonte médio, o qual deve informar quais itens serão produzidos e quando cada um será produzido. O PMP está diretamente ligado à gestão de demanda verificando a necessidades de produtos finais, indicando a quantidade e período de tempo em que deverão estar prontos. Entretanto nesta etapa não são detalhados as necessidades de produção dos componentes de cada produto.

Para o cálculo da demanda de produtos, são utilizados dados sobre a demanda dependente (quando o produto em questão faz parte ou depende, de outro produto), sobre a demanda independente (que não depende de nenhum outro produto) dos produtos em carteira e do nível de estoque dos produtos [31].

Estabelecendo assim quando e em qual quantidade cada produto deverá ser produzido dentro do horizonte de tempo estabelecido, executando a função de conciliar a

capacidade disponível e demanda existente para o período, com o intuito de atender, os pedidos dentro dos prazos estabelecidos, podendo fazer uma previsão de quando poderá ocorrer algum atraso nesses pedidos.

O PMP deve orientar os demais planejamentos da produção, inclusive a programação a cada ciclo do horizonte curto, porém alterações podem ser necessárias e o PMP alterado de acordo com mudanças na demanda e alterações do estoque além de eventuais eventos mais drásticos como a quebra de máquinas por longos períodos ou greves de funcionários.

3.1.2 Geração das Ordens de Fabricação

Seguindo o Plano Mestre de Produção o setor de PPCP deve concretizar essa demanda através da emissão de ordens de fabricação (OF), para isso é utilizado a estrutura de produto (BOM – Bill of Materials) para explodir todos os componentes necessários em forma de ordens de fabricação. Normalmente a emissão dessas ordens concretiza as reservas de estoque para a fabricação das mesmas firmando assim a necessidade do material com o setor de armazenagem.

Cada OF deve ter um código de identificação único e possuir um roteiro de fabricação. Este roteiro pode ser definido máquina a máquina ou por grupos de máquina (*flexible scheduling*).

A priorização das ordens deve ser realizada com o objetivo de obter tratamentos diferenciados por parte das técnicas de programação para casos de maior importância de clientes ou até mesmo a urgência de entrega de alguns produtos. Existe também o caso de prioridades maiores devido à programação já estabelecida onde se pretende dar maiores importâncias às ordens planejadas no caminho crítico, ou seja, aquelas ordens que se sofrerem atrasos acabam atrasando a produção toda.

Em alguns casos algumas OFs podem ser geradas para suprir algumas demandas do próprio chão de fábrica como é o caso de ordens de fabricação de componentes de reposição em lotes onde houve a perda de algum material, geralmente estas ordens apresentam um nível de prioridade maior devido ao seu caráter urgente.

Algumas fichas podem ser impressas para identificar o material no chão de fábrica e até mesmo facilitar o registro de certas ocorrências. Em um ambiente com uma programação preditiva estabelecida com técnicas de sequenciamento é importante que estas

fichas sejam facilmente identificadas visualmente para que o operador não gaste muito tempo procurando pela próxima OF a ser executada.

3.1.3 Definição das Restrições do Processo

Considera-se como restrição do processo qualquer regra ou especificação no que diz respeito à fabricação de um determinado produto, como sequência de fabricação, máquinas alternativas, tempo de espera, modo de locomoção de materiais, etc.

Essas definições trarão impacto direto sobre as técnicas de programação, pois cada restrição tem diferentes complexidades a serem tratadas pelos algoritmos. Exemplos de restrições já foram discutidos na seção 2.1.

Apesar de serem teoricamente estáveis, os parâmetros sobre as restrições do processo podem necessitar de alterações durante a adição de novos produtos na linha de produção, mudança e aperfeiçoamento de máquinas ou até mesmo ações de melhoria propostas pelo setor de engenharia.

3.1.4 Definição da Capacidade e Disponibilidade dos Recursos

A capacidade e a disponibilidade dos recursos são os parâmetros mais dinâmicos de uma indústria, inúmeros fatores como rotatividade de mão de obra, quebra de máquina e turnos extras podem alterar drasticamente estes parâmetros, por isso um esforço adicional é exigido para manter os cadastros do sistema sempre atuais.

Em algumas empresas os líderes de produção tem a autonomia suficiente para estabelecer horas extras e até mesmo modificar momentaneamente os turnos de trabalho visando o cumprimento de suas metas por isso é importante que o canal de comunicação entre o PPCP e a produção seja ágil o suficiente para cobrir estas mudanças no sistema de programação.

Já a capacidade esta relacionada diretamente aos tempos padrões de produção para cada produto, os quais serão discutidos mais detalhadamente nas próximas seções.

Valores referentes aos custos de utilização de cada ferramenta também podem ser úteis para auxiliar no processo de programação visando maximizar a ocupação de equipamentos com melhores custos-benefícios.

3.1.5 Execução dos Algoritmos e Simulação das Possíveis Soluções

Estabelecido todos os parâmetros necessários nos passos anteriores, o PPCP inicia o processo de simulações utilizando-se da ferramenta APS e os algoritmos disponíveis na mesma. Além do processo computacional que envolve a execução dos algoritmos, a experiência dos usuários pode ajudar com ajustes manuais nas soluções obtidas. Normalmente ferramentas deste tipo apresentam inúmeras configurações inerentes aos algoritmos que podem auxiliar na obtenção de melhores resultados.

Um dos benefícios destas ferramentas é que várias soluções podem ser geradas e comparadas para escolha do usuário. Gráficos de gantt exibem de forma visual a sequência de fabricação das ordens e indicadores mensuram a eficiência de cada solução possível.

Um tempo maior dispendido nesta fase pode significar a obtenção de melhores soluções e ganhos mais significativos na execução do planejamento. Por isso a ferramenta APS deve oferecer uma boa quantidade de algoritmos e técnicas com ajustes de ambiente para ampliar o número de possibilidades e conseqüentemente uma gama maior de soluções factíveis.

Nesta atividade deve-se atentar para o fato que a execução dos algoritmos pode estar ocorrendo para o início de mais um ciclo de produção ou para montar uma programação parcial após a ocorrência de uma ruptura. No primeiro caso tem-se somente a preocupação em gerar a melhor solução para o próximo nível aliada a revisão dos parâmetros da ferramenta, já no segundo caso o tempo dispendido na simulação é outro ponto importante para se preocupar, já que quanto mais rápido a nova solução é gerada, menores são os prejuízos com a ocorrência da ruptura. Por isso no caso de tratamento de rupturas muitas vezes executa-se a mesma parametrização dos algoritmos utilizados na última simulação apenas com a atualização dos estados das ordens em produção.

3.1.5.1 Técnicas de sequenciamento

Para que o método adaptativo possa ser executado de forma completa a ferramenta de programação da produção deve conter mais de uma técnica de sequenciamento, isso possibilitará a análise comparativa entre elas, gerando mais uma possibilidade de adaptação e evolução do sistema.

Dentre as técnicas apresentadas, serão utilizadas as que permitem a utilização da função fitness como as buscas locais. A função será outro ponto de adaptação e os critérios de escolha poderão ser modificados.

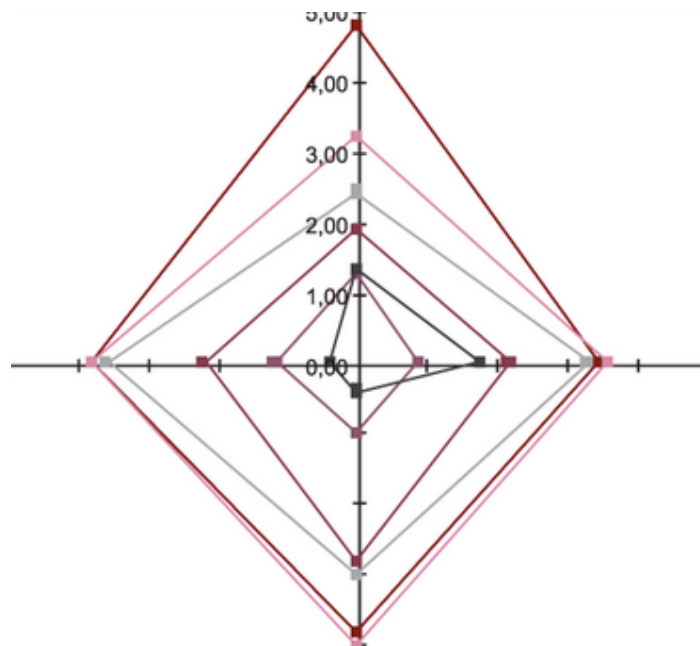
3.1.6 Escolha da Solução e Análise das Técnicas

Para a escolha da melhor solução o operador do PPCP deve ter exatamente quais os objetivos prioritários e as margens aceitáveis dos outros fatores para que possa calibrar bem a função fitness e saiba fazer um refinamento manual das soluções encontradas. Conforme descrito na seção 2.5.1.1 ressalta-se que para uma função fitness bem calibrada deve considerar vários objetivos.

Muitas soluções podem obter performances parecidas e neste momento vale a experiência do operador para identificar as diferenças que possam evidenciar a melhor entre elas.

Uma boa ferramenta de análise é o gráfico aranha onde os objetivos da programação são representados por vértices e as soluções são representadas por linhas que cruzam os vértices de acordo com o desempenho das mesmas em relação ao objetivo do vértice conforme figura abaixo. Este processo de análise (gráfico aranha) pode ser uma funcionalidade adicional da ferramenta APS ou um sistema integrado com este objetivo de comparação e análise dos resultados.

Figura 16 – Exemplo de gráfico aranha para análise de soluções



3.1.7 Estabelecimento da Solução Preditiva

Um processo de divulgação deve ser estabelecido para que a solução escolhida seja passada para todos da empresa, é nesta fase em que os dados sobre o cronograma de produção é transmitido para os sistemas de gestão integrado (ERP) e o sistema que acompanhará a execução no chão de fábrica (MES).

A integração entre os sistemas é importante para que se mantenham as mesmas datas para todos os departamentos, a informação deve ser confiável para possibilitar a coordenação entre todas as atividades que envolvem a produção.

Tão importante quanto encontrar boas soluções na ferramenta APS é o trabalho de repasse dessas informações para a produção, a equipe da fábrica deve assumir a programação preditiva como uma meta a ser cumprida, assim garantirá os benefícios encontrados pelos algoritmos de sequenciamento.

Em casos de soluções geradas para corrigir rupturas o seu repasse deve ser feito de forma rápida, neste caso é aconselhado que houvesse painéis ou pontos de acesso ao sistema no chão de fábrica para atender a dinâmica do sequenciamento de tarefas e que evitando que não haja tempo perdido com impressão e distribuição de fichas de produção.

3.1.8 Outras Programações

Um dos propósitos da programação é servir de base para outros planejamentos e como forma de integração entre áreas cooperantes com isso pode-se ressaltar algumas áreas onde a programação poderia ser útil:

- As datas de conclusão das ordens de fabricação podem guiar o pessoal da expedição e logística para uma ação de entregas com prazos curtos aonde pouco se vai para o estoque de produtos acabados. Em muitas empresas os produtos saem da linha de produção e vão direto para a expedição.
- Dependendo do segmento da indústria pode haver a necessidade de uma equipe para o deslocamento de materiais dentro da fábrica e com isso a programação pode dar apoio ao ordenamento e sincronização destes traslados.
- Hoje em dia é comum a terceirização de alguns processos intermediários da fabricação de produtos e com isso as empresas (fabricante e fornecedor) devem estar em sintonia para uma não atrasar o trabalho da

outra. A programação da produção pode ser uma boa ferramenta para gerenciar as ordens e prazos de terceirização nestes casos.

- A maioria das empresas possuem rotinas de manutenção de equipamentos em períodos já predeterminados (manutenção preventiva) e para minimizar os prejuízos com o tempo em que as máquinas ficam paradas o agendamento das manutenções devem estar em sintonia com a programação da produção, existindo até a possibilidade de incorporar estas manutenções programadas na parametrização dos algoritmos de sequenciamento para que as mesmas sejam otimizadas pela ferramenta APS.

3.2 FASE DA EXECUÇÃO

Conforme foi descrito na seção 2.6.1 o sistema MES é o responsável por gerenciar a execução da programação no chão de fábrica. Ele pode fazer uso de painéis para realizar a liberação das ordens de acordo com a sequência estabelecida além de gerenciar as máquinas e funcionários que estão executando as tarefas.

Todo o armazenamento de informações como a coleta de tempos para cada ordem de produção e rastreabilidade de recursos podem gerar mais indicadores para análise do processo, permitindo assim a alimentação de dados confiáveis para a gerência e departamento de qualidade.

Em posse da solução preditiva, o MES pode fazer o controle e liberação das ordens de produção para as células de trabalho, supervisionando o trabalho em tempo real. Alertas podem ser gerados após algum atraso significativo ou qualquer outro desvio do planejamento.

Pontos de acesso ao sistema como painéis digitais, IHMs ou outros terminais de rede permitem aos operadores da fábrica acesso às informações sobre o planejamento de forma sincronizada, sem a necessidade de fichas e outros documentos que possam ficar desatualizados e criar desentendimentos devido a dinamicidade do sistema.

Paradas não programadas podem ser identificadas mais facilmente pela gerência e equipe técnica de manutenções e permitem uma reação mais ágil para quebra de ferramentas.

3.2.1 Rupturas na Programação

Dependendo do desvio identificado pelo sistema MES, a solução preditiva pode deixar de ser factível, como a quebra de uma máquina, inserção de novas ordens devido a urgência de retrabalhos e reposições de peças. Por isso o sistema de forma automática, respeitando as políticas pré-definidas para rupturas, ou de forma manual pelos operadores PPCP podem iniciar o procedimento reativo da programação, ou seja, atualizar o que foi feito até o momento e reprogramar as tarefas pendentes com o novo cenário.

Dentro da política de rupturas pode-se considerar um atraso máximo de alguma célula de trabalho, alterações na disponibilidade de recursos (quebras de máquina, ausência de operadores, mudanças de turnos, inserção de horas extras, etc.) e inserção de novas ordens de produção com maiores prioridades.

Como o replanejamento deve ser feito geralmente de forma mais rápida que o planejamento normal de fim do horizonte, as únicas alterações nos parâmetros da ferramenta APS sugeridas são a atualização dos status das ordens, se possível com a quantidade de peças pendentes no caso de ordens já iniciadas e atualização na disponibilidade dos recursos no caso de alterações.

Como status das ordens de produção pode-se citar os seguintes valores possíveis:

- Pendente: ordem ainda não iniciada e com operações a serem feitas.
- Em processo: ordem atualmente na célula de trabalho, ou com algumas peças feitas ou apenas com setup aberto.
- Parcialmente pendente: Ordem com peças ou operações concluídas e por algum motivo foi interrompida, tendo assim peças ou operações pendentes para sua conclusão.
- Concluída: Ordem totalmente concluída, sem peças ou operações pendentes.
- Interrompida ou Cancelada: Ordem que pode haver peças ou operações concluídas, mas por algum motivo foi interrompida, sem a necessidade de conclusão.

3.3 FASE DE ANÁLISE

Durante a Análise da Execução e Estratégia de Melhoria, ao fim do horizonte curto de planejamento chega-se ao fim de mais um ciclo de melhoria onde os resultados devem ser analisados e novas ações devem ser propostas para os problemas identificados.

3.3.1 Cálculo dos Indicadores

Os indicadores já foram discutidos na seção 2.5 e devem representar os objetivos da empresa quanto à melhoria do processo, para isso é aconselhável não utilizar muitos indicadores para não desvirtuar a análise, apenas uns 3 ou 5 indicadores mais prioritários podem direcionar melhor a análise e simplificar o processo de melhoria.

Alguns indicadores qualitativos podem ser incorporados à análise através da coleta de dados manual entre funcionários e responsáveis, quantificadores como “regular”, “bom” e “muito bom” podem ajudar no processamento dos dados.

Mas é muito importante que os dados provindos da produção sejam calculados de forma automática e até mesmo disponíveis durante a própria execução com resultados parciais, incentivando a produção a atingir as metas definidas.

3.3.1.1 Indicadores de desempenho

O desempenho da produção deverá ser medido de acordo com um conjunto de indicadores estipulados para cada empresa. Esses indicadores devem representar os diversos departamentos da empresa tais como financeiro, recursos humanos, almoxarifado, etc. É importante que os indicadores representem não somente a performance produtiva da empresa, valores humanos, qualidade do produto e saúde financeira também são imprescindíveis para uma melhor evolução dos parâmetros.

Para garantir a utilização desses indicadores durante o processo de adaptação da ferramenta de programação é necessário adicionar indicadores de desempenho, tais indicadores informaram se a execução do plano pré-agendado sai como planejado. Isso impedirá uma interpretação incorreta dos resultados obtidos, ou seja, o sistema deve saber se o planejamento não foi bom ou não foi feito conforme planejamento.

Portanto os indicadores principais para o processo de melhoria serão a estabilidade e robustez da solução preditiva.

3.3.2 Análise das Ações de Melhoria

Durante a análise dos indicadores é importante averiguar quais as mudanças ocorridas nos resultados e se elas estão relacionadas às ações de melhoria executadas nos ciclos anteriores, nesse momento é importante lembrar que nem todas as ações surtem apenas benefícios, elas podem gerar maus resultados principalmente quando a ação é proposta baseada em apenas uma ocorrência isolada sem pensar em todo o processo de produção e os impactos que a ação provocaria. Existem ainda ações que não provocam resultados significativos nem para melhor nem para pior, elas devem ser analisadas mais criteriosamente para ver se o resultado ainda pode ser obtido através da combinação com mais ações ou simplesmente deve ser desistida para poupar tempo com sua análise e implantação.

Como todas essas possibilidades, o responsável pelo planejamento deve ter um olho crítico para algumas características que devem ser observadas durante esta análise:

- Tempo de resposta: Toda ação de melhoria tem um tempo de resposta para gerar os resultados, alguns podem ser imediatos e outros podem demorar meses.
- Ações em combinado: Muitas ações dependem de outras para surtir efeito, ou até mesmo ter efeito contrário se combinado com outras ações, sendo assim necessária a análise em conjunto para mensurar o benefício de cada uma.
- Prazo de validade: Algumas ações geram resultados por determinados períodos de tempo, geralmente aquelas propostas em períodos de mudança na fábrica ou até que outra ação anule os seus efeitos.
- Efeitos múltiplos: Ações geralmente provocam vários efeitos no processo, alguns bons outros ruins, por isso cabe ao operador levantar novas ações em combinado para anular os efeitos ruins.

As ações que forem julgadas como ineficientes devem ser retiradas para poupar os esforços para novas propostas de melhoria.

3.3.3 Novas Ações de Melhoria

As novas ações de melhoria podem ser propostas por qualquer funcionário da empresa, mecanismos de levantamento devem ser implantados para coletar as ideias como ambientes virtuais, caixas de sugestões, relatórios ou entrevistas periódicas, brainstorming, etc.

Durante o ciclo de iterações com o horizonte de planejamento, o método proposto deve ser trabalhado em um intervalo não muito curto para que as adaptações evolutivas tenham efeitos mais visíveis aos responsáveis. Com este intervalo maior é recomendável estratégias reativas para o reajuste da solução em tempo de execução.

São inúmeras as adaptações possíveis, como já foi visto nos trabalhos de Lambrechts; Demeulemeester; Herroelen [23] e Mehta e Uzsoy [28], mas para este estudo apresentar-se-á algumas adaptações que foram selecionadas pensando em facilitar a demonstração dos sistemas de apoio.

3.3.3.1 Atualização de tempos

O primeiro passo a ser adequado é o ajuste frequente dos tempos padrões de produção. A ciência que trata o cálculo e medição dos tempos de produção é chamada de cronoanálise e sugere a cronometragem do processo para estipulação dos tempos padrões. Para essa cronometragem seriam tomados de 10 a 15 tempos e pela análise média seria estipulado o tempo padrão [26]. Como neste caso tem-se um sistema de coleta de informações, os tempos serão medidos para cada operação, então o sistema descarta os maiores e menores tempos e assume como tempo padrão a média do restante.

Quando se discute a respeito de tempos padrões, tem-se em mente os seguintes tempos:

- **Tempo padrão de operação:** é o tempo concedido a um ou mais operadores qualificados, trabalhando em um ritmo normal e sujeito a demoras e fadigas normais para executarem uma quantidade definida de trabalho de uma qualidade específica. Para cada produto i na célula de trabalho j se tem um tempo padrão p_{ij} .
- **Tempo padrão de setup:** é o tempo concedido para preparação do equipamento para execução corretamente do produto em questão. Para

cada célula de trabalho j tem-se um tempo padrão de setup para término do produto i e início do produto k igual a $s_{j,i-k}$. Seguindo a mesma idéia $s_{j,0-i}$ denota o tempo de preparação da célula j para processamento do produto k quando não há nada sendo processado antes (início de turno), e $s_{j,i-0}$ denota o tempo de limpeza necessário para deixar a máquina depois de fazer o produto i sem que haja nenhum processo posterior.

- **Tempo padrão de locomoção e preparação de materiais:** Estes tempos muitas vezes são embutidos dentro do tempo padrão de operação, mas é importante que seja tratado separadamente com o objetivo de melhorar a otimização pelo algoritmo de sequenciamento. Eles representam o tempo concedido para que os produtos e materiais que serão trabalhados sejam levados até a célula de trabalho correspondente e seja ajustado para a operação. Denota-se por $h_{i,j-l}$ o tempo necessário para manusear (*handling*) o produto i da célula de trabalho j para a l .

Para cada um dos tempos a atualização se dará da seguinte forma:

$$t = t_0 - \left(t_0 - \frac{\alpha(T)}{n} \right) * \beta \quad (3.1)$$

Onde:

t = novo tempo padrão

t_0 = antigo tempo padrão

T = conjunto dos tempos coletados

α = função que elimina os tempos discrepantes

n = número de tempos retornados pela função α

β = Constante de adaptação

3.3.3.2 Margem de segurança (Buffers)

Inventário em processo (WIP – *work in process*) são os materiais que já iniciaram e ainda não completaram o processamento, podendo estar em filas, em processamento, em ordens interrompidas ou em reserva, esperando aproveitamento. A maioria dos objetivos buscados pelas empresas requer a redução ao mínimo possível do estoque em processo para que o valor de investimento imobilizado seja o menor possível. O problema é que com margens pequenas de estoque pode ocasionar a parada do setor ou fábrica por falta de material.

Geralmente setores gargalos do sistema produtivo possuem margens maiores de estoque em espera (*buffer*), já que a parada deste pode significar o atraso da linha toda.

Algumas técnicas de sequenciamento já preveem esses possíveis eventos e trabalham com a margem de segurança através de limites inferiores (L_i) e superiores (L_s) para as quantidades de material em cada etapa, estes valores geralmente são trabalhados por tempo de trabalho.

Para o correto ajuste dos limites que controlam o estoque de segurança precisa-se definir as seguintes constantes: tempo de tolerância para paradas de máquina por falta de material (Tp); incremento de tempo de trabalho (B_+); e meta para estoque em processo para as células de trabalho (M_j). Assim para cada célula de trabalho j a adaptação se dará da seguinte forma:

$$\text{Se } L_p(j) > Tp \text{ então } L_i(j) = L_i(j) + B_+ \text{ e } L_s(j) = L_s(j) + B_+$$

$$\text{Senão Se } I_m(j) > M_j \text{ então } L_i(j) = L_i(j) - B_+ \text{ e } L_s(j) = L_s(j) - B_+ \quad (3.2)$$

Onde:

I_p = Indicador para paradas por falta de material

I_m = Indicador para qtds de material em processo

3.3.3.3 Escolha da técnica de sequenciamento

Como o método adaptativo proposto não é restrito a nenhuma técnica de sequenciamento, inicialmente a técnica que gerar a melhor solução segundo os critérios adotados na função *fitness* será utilizada. Porém para garantir que cada técnica esteja respeitando as restrições do ambiente quanto à sequência de operações escolhida se utilizará um critério de exclusão da técnica caso haja uma sequência de não cumprimentos do plano durante a execução.

A avaliação desse ajuste é muito subjetiva, por não se saber corretamente o motivo pelo qual o plano não pode ser seguido à risca, mas a constante falta de fidelidade entre o planejado e real pode ser indicio de que a técnica esteja gerando soluções a quem da capacidade produtiva, ou a sequência de operações não seja tão boa na prática.

O critério adotado então para remover uma técnica da lista é que o indicador de desempenho que mostra a discrepância entre o planejado e o real mostre valores negativos

por mais de k vezes. Essa quantidade de ciclo pode ser adotada também para realizar a volta de técnica para a lista de opções após um período de exclusão.

3.3.3.4 Alterações dos critérios da função fitness

A escolha dos critérios adotados na função fitness requer diretrizes estratégicas da empresa e depende muito do foco industrial da mesma. Por isso uma ferramenta de software dificilmente conseguiria estipulá-las sozinho visando o crescimento da empresa.

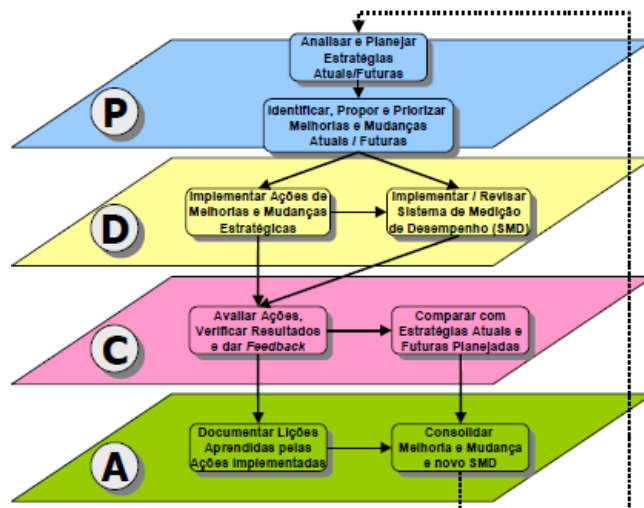
Neste caso em específico o software não ajustará automaticamente os valores, e sim sugerirá novos critérios ou nova lista de prioridades para a redução de custos de produção.

Dessa forma, em ciclos de tempos maiores, o responsável industrial deve revisar os critérios adotados e os novos critérios sugeridos para tomar a decisão de substituição ou não da função *fitness*.

3.4 FASE DE AÇÕES DE MELHORIA

Adotando a proposta de Gerolamo [17], que propõem um processo sistematizado para gestão de melhorias e mudanças de desempenho, a figura abaixo demonstra o macroprocesso de melhoria através de uma sequência de atividades inseridas no ciclo PDCA.

Figura 17 – Visão geral da gestão do ciclo de melhoria contínua proposto por Gerolamo [17]



Segundo o autor, as ações de melhoria desenvolvidas pelo método são chamadas de Ações de Melhoria Baseadas na Estratégia Atual (AMEA), já que são ações de curto a médio prazo com o objetivo de preencher lacunas existentes na estratégia atual de programação da produção.

O processo de melhoria contínua será dado através de ciclos de acompanhamento com período igual ao horizonte curto de planejamento. Em cada fim de ciclo os indicadores serão calculados e as adaptações sugeridas pelo método serão implementadas para a programação do próximo período.

Categorizando as atividades dentro do ciclo têm-se escolhas e alterações dos critérios (objetivos) da função *fitness* e as estratégias para aumentar a flexibilidade, estabilidade e robustez da solução, as quais se encontram na etapa de planejamento (P).

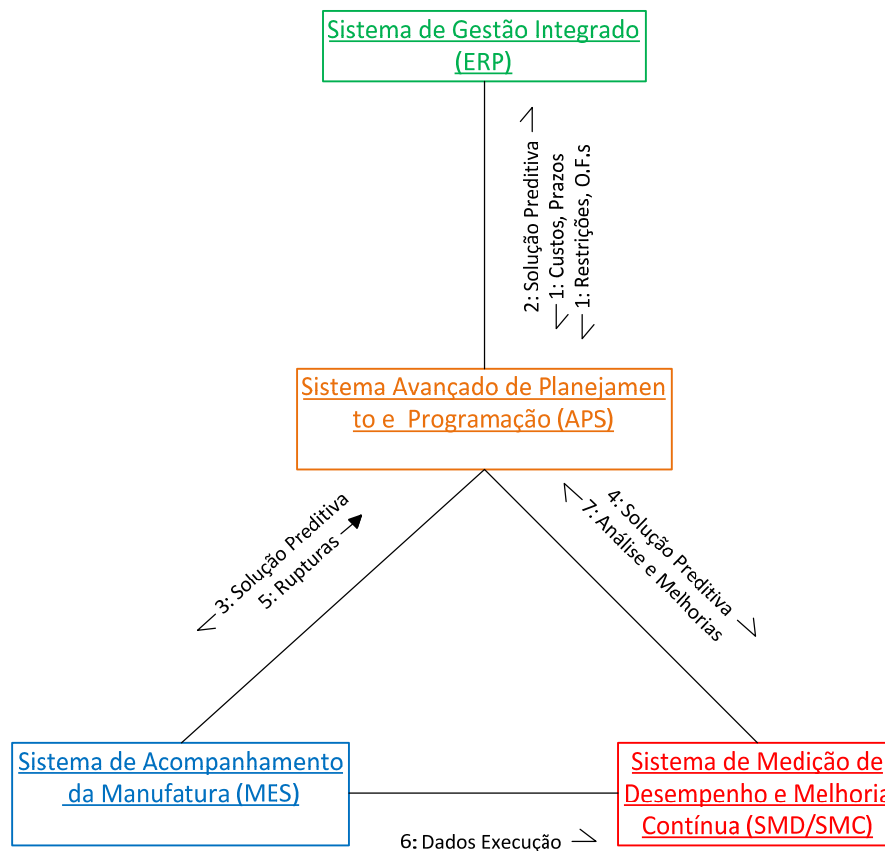
A definição dos novos parâmetros do sequenciamento de operações como tempos, buffers e escolha das técnicas é tratada na etapa de execução (D).

Após o período do horizonte curto, os resultados são avaliados através dos indicadores de desempenho (C) e podem ser definitivos ou não de acordo com a evolução de desempenho mostrado (A). Então novas ações podem ser propostas e inicia-se outro ciclo.

3.5 Arquitetura e Interface entre Sistemas

Como descrito por Liu et al. [25] a utilização deste método requer a implantação das várias ferramentas já mencionadas, para a proposta deste trabalho se tem que a integração entre os sistemas pode ser descrita conforme diagrama de colaboração demonstrado na Figura 18.

Figura 18 – Integração entre os sistemas cooperantes para a proposta de sistema adaptativo



O sistema ERP deve enviar para o sistema de programação da produção os seguintes dados (1):

- Ordens de Produção com a explosão de materiais necessários (BOM). O BOM, ou estrutura do produto, é uma das informações fundamentais da manufatura, pois nela registram-se as informações de produtos utilizadas por todos os setores e processos envolvidos com a manufatura do produto.
- Recursos disponíveis no chão de fábrica. Disponibilidade dos recursos, dispostos em turnos. Considerando paradas programadas para manutenções e feriados.
- Sequência de fabricação de cada item seguindo a ordem dos processos especificada na engenharia dos produtos. No caso de sistemas *Flow shop* o roteiro é único para todos os produtos.

- Plano mestre de produção com prazos de entrega para os pedidos e ordens a serem fabricados no horizonte curto. Pode conter neste plano também a prioridade de cada ordem e restrições quanto à multas sobre o atraso de entrega.
- Custos de mão de obra e custos operacionais de fabricação, assim a programação da produção pode calcular o custo envolvido na utilização de cada recurso.

Com os dados em mão o sistema de sequenciamento de operações irá procurar a melhor solução de acordo com os objetivos estabelecidos através da função *fitness*. Essa solução então enviada aos outros sistemas com as seguintes informações (2), (3) e (4):

- Cronograma de produção detalhado com datas previstas para início e término de cada operação. Com esse planejamento o ERP adquire mais confiança nos prazos que garantiu aos seus clientes (2). O sistema de acompanhamento obterá os prazos a serem seguidos e conseguirá liberar as ordens no momento certo (3). O sistema de medição de desempenho assumirá o planejamento como meta a ser cumprida na execução (4).

Após a programação para o horizonte curto estar completa, o sistema de coleta e acompanhamento faz o controle necessário alertando sobre desvios e obtendo os dados reais de execução. Essa coleta pode ser de forma manual através de planilhas ou em tempo real, no qual, coletores de dados são instalados no chão de fábrica para obter as informações diretamente com os operadores e máquinas.

Durante a execução pode ocorrer imprevisto como perda de material, ordem para reposição, quebra de máquina, etc. Em técnicas de programação reativa o sistema de acompanhamento passa pra o programador de produção para que ele faça os ajustes necessários e repasse o novo cronograma (5).

Ao fim do horizonte curto, os dados coletados são repassados para o sistema de medição de desempenho para cálculo e análise dos indicadores (6):

- Os apontamentos de produção devem conter além do início e término real de cada operação, os recursos e materiais que foram utilizados durante o processo para garantir a rastreabilidade da produção.
- Outro ponto importante são os registros de paradas não programadas, a árvore de perdas de tempo deve gerar indicadores de desempenho indireto quanto ao cronograma escolhido.

Em posse do planejado X executado, o sistema de medição de desempenho irá calcular os indicadores relativos ao desempenho da produção como custo e produtividade e também indicadores relativos a discrepância entre o real e o planejado (estabilidade e robustez).

A amarração do desempenho realizado com o histórico da empresa é feita pelo sistema de melhoria contínua para que a evolução seja relacionada às ações de melhoria praticadas pela empresa ou pelo método adaptativo. Esta análise por sua vez é enviada ao sistema de programação da produção com as seguintes informações (7):

- Os indicadores de diferença dos tempos praticados serão considerados e mudanças nos tempos padrões podem ser feitas, tanto para tempos de capacidade quanto para setup e traslado de peças.
- Os indicadores de desempenho da produção serão considerados para propor ações de melhorias nos parâmetros do sequenciamento. Essas ações serão exemplificadas melhor a seguir.

3.6 CONSIDERAÇÕES

Percebe-se no método MAP-Prod a adaptabilidade do processo de programação da produção através da combinação de características das abordagens proativa e reativa, que juntas proporcionam um processo de adequação momentânea aos desvios do planejamento e em longo prazo através do processo de melhoria realizado entre os ciclos de planejamento.

A capacidade de gerar soluções preditivas melhores e incorporar as ações de melhoria sugeridas durante a atualização de parâmetros está fortemente ligado a quantidade de parâmetros e técnicas de sequenciamento implementadas na ferramenta APS. O desempenho de cada técnica pode estar atrelado ao sistema de produção adotado por cada indústria e o sucesso de cada simulação pode depender a quantidade de cenários e objetivos que se possa adotar na ferramenta.

O MAP-Prod pode se tornar um método de difícil implantação devido a combinações de várias ferramentas e a necessidade de implementar rotinas para integração entre os sistemas. Mas é justamente a união das funcionalidades dos sistemas que torna o método um forte aliado na busca de um processo de fabricação eficiente. O processo de melhoria contínua pode gerar mudanças na cultura da empresa promovendo ações propostas pelos próprios funcionários.

Durante o processo de melhoria contínua pesquisado na literatura não houve nenhuma menção sobre a utilização de ferramentas para auxiliar e dar maior visibilidade do mesmo, por isso neste trabalho propôs-se a utilização de um sistema de medição de desempenho e melhoria contínua para gerenciar este processo de adaptação.

As vantagens previstas com o apoio destes sistemas são:

- Maior visibilidade do processo de melhoria contínua através da medição de indicadores quantitativos e qualitativos obtidos durante o acompanhamento das adaptações no modelo (ações de melhoria).
- Análise comparativa entre os indicadores de desempenho da programação com os indicadores da execução relacionando-os com as ações de melhoria feitas durante a fase de montagem da programação.
- Estabelecimento de metas e acompanhamento das mesmas.
- Histórico de desempenho para análise e projeção de sazonalidades ou tendências.
- Rastreabilidade entre ações e resultados obtidos, auxiliando no equilíbrio entre margens de segurança adicionadas ao sequenciamento preditivo para aumentar a flexibilidade e a qualidade da solução executada, dificuldade esta citada por Lambrechts; Demeulemeester; Herroelen [23].
- Permitir a colaboração de todos os envolvidos nas avaliações qualitativas e ajudar na distribuição das informações.
- Todas as vantagens implícitas no uso de sistemas de gestão da qualidade como o aumento da confiança e satisfação de clientes (internos e externos) e fortalecimento da imagem da empresa.

4 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DO MAP-PROD NA INDÚSTRIA MOVELEIRA

Neste capítulo serão demonstrados a aplicação da proposta, e os resultados que podem ser obtidos com a utilização do MAP-Prod através de um estudo de caso realizado em uma indústria do setor moveleiro. O foco será na análise do comportamento das ferramentas e o grau da adaptação dos parâmetros utilizados no sequenciamento de operação. Os indicadores de desempenho organizacional mostrarão o avanço da empresa quanto à programação da produção com a aplicação do método adaptativo.

No estudo de caso, para aplicação do MAP-Prod (figura 15) selecionou-se uma Indústria do setor moveleiro, que utiliza as ferramentas desenvolvidas por uma empresa de software, ambas as empresas estão descritas no item 4.1, Ambiente. No item 4.2, Ferramentas, descreve os sistemas que o método empregou: para o ERP utilizou-se o Sistema de Gestão Integrado (SGI); para o MES aplicou-se um sistema denominado Sistema de Monitoramento de Processos Industriais (MPI); a título de experimento e simulação para este trabalho empregou-se o Módulo de Sequenciamento de Máquinas (MSM) como o APS, e o Sistema de Medição de Desempenho/Sistema de Melhoria Contínua (SMD/SMC), como o módulo SMD/SMC de mesmo nome adotado no método. Após a explanação do Ambiente e dos Materiais escolhidos para a aplicação será demonstrado a aplicação do método MAP-Prod junto com a análise dos resultados obtidos no estudo de caso.

4.1 AMBIENTE

O estudo de caso se deu em uma indústria do setor moveleiro, fabricante de móveis seriado com sistema produtivo caracterizado por *flexible job shop* (centros produtivos com mais de uma máquina em paralelo e com roteiros de fabricação diferenciados para cada produto).

A empresa realiza a programação da produção através da técnica de carga x máquina, ou seja, os prazos limites de produção são estipulados através da capacidade diária de cada setor sem considerar a sequência e a interdependência das ordens de produção.

O processo produtivo é composto por diversas atividades, as quais podem ser agrupadas pelas seguintes operações:

- Corte: Secção de chapas de madeira com tamanhos padrões para tamanhos específicos das peças desejadas. Um otimizador de plano de

corte é utilizado para minimizar perdas de material. O agrupamento das peças é feito pelo material utilizado (espessura da chapa).

- Bordas: Colagem das bordas (fitas de PVC) nas laterais de cada peça. Dependendo da peça pode haver a necessidade de uma ou mais laterais com bordas.
- Furação e usinagem: Acabamento da estrutura da peça, onde furos e cantos são trabalhados.
- Pintura: Processo por onde a peça recebe várias mãos de tinta até ficar na cor desejada.
- Embalagem: Os produtos são embalados sem montar, as peças são agrupadas em caixa e as máquinas de empacotamento fazem o serviço de lacre e fechamento da embalagem.

Encontra-se no processo produtivo a restrição de precedência entre o produto embalado e os componentes que devem formar o produto final, a restrição de preparação de máquinas, onde cada operação requer um tempo de *setup* para dar início a produção e a restrição de família de materiais que restringe a operação de corte a componentes de mesma espessura e no processo de pintura com componentes de mesmo acabamento (cor).

A empresa trabalha em diversos turnos e horas extras podem ser definidas dinamicamente, o que exige um esforço para manter os parâmetros de recursos ajustados mais frequentemente. Cada célula de trabalho apresenta equipamentos com idades e eficiência diferentes, mesmo aquelas que realizam as mesmas operações, por isso são trabalhados tempos padrões diferenciados para cada uma. Já os lotes são gerados para cada tipo de produto final e possui inúmeras ordens de produção para cada componente do mesmo.

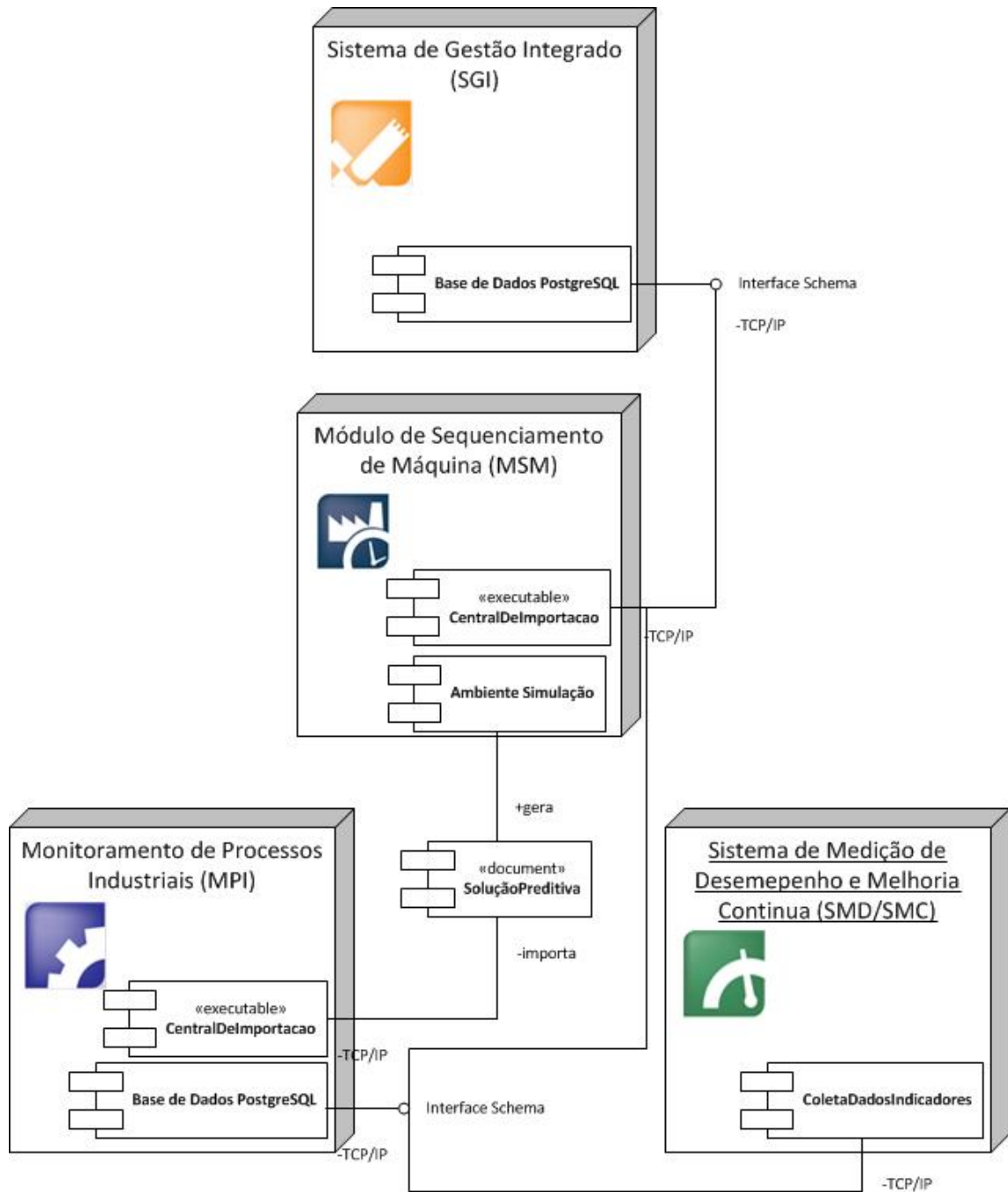
4.2 FERRAMENTAS

Para a aplicação do método, é possível utilizar os sistemas existentes no mercado quando estes possam trabalhar de forma integrada conforme a arquitetura apresentada na Figura 18, Neste estudo de caso serão utilizadas ferramentas disponíveis no mercado e desenvolvidas pela empresa Guenka Software, uma empresa localizada em Londrina que nasceu na Incubadora Internacional de Empresas de Base Tecnológica da UEL (INTUEL), que dentro do contexto desta pode ser traduzida, conforme suas ferramentas, no

digrama de componente/implantação conforme Figura 19. As ferramentas foram escolhidas pelo conhecimento adquirido pelo autor deste trabalho durante a participação nas equipes de desenvolvimento destas e por se tratar de sistemas que já apresentam alguma forma de integração.

Além de a empresa disponibilizar as ferramentas sem custo para este trabalho, grande parte do conhecimento prático para este trabalho foi adquirido através de alguns cases em clientes da mesma para o levantamento de requisitos e identificação de falhas no processo atual aplicado na maioria das indústrias atendidas por ela. Outro ponto positivo é a experiência em projetos de pesquisa e base científica aplicada nas ferramentas proporcionadas pela origem acadêmica da empresa.

Figura 19 – Integração das Ferramentas do Estudo de Caso



4.2.1 Sistema de Gestão Integrada (SGI)

Foi utilizado um sistema web, capaz de integrar o setor financeiro à manufatura, é uma variação de ERP para pequenas e médias empresas. Nele é possível cadastrar toda a ficha técnica dos materiais (produtos finais e componentes) inclusive com seu roteiro de fabricação.

Figura 20 – Cadastro de ficha técnica com roteiro de fabricação na ferramenta ERP

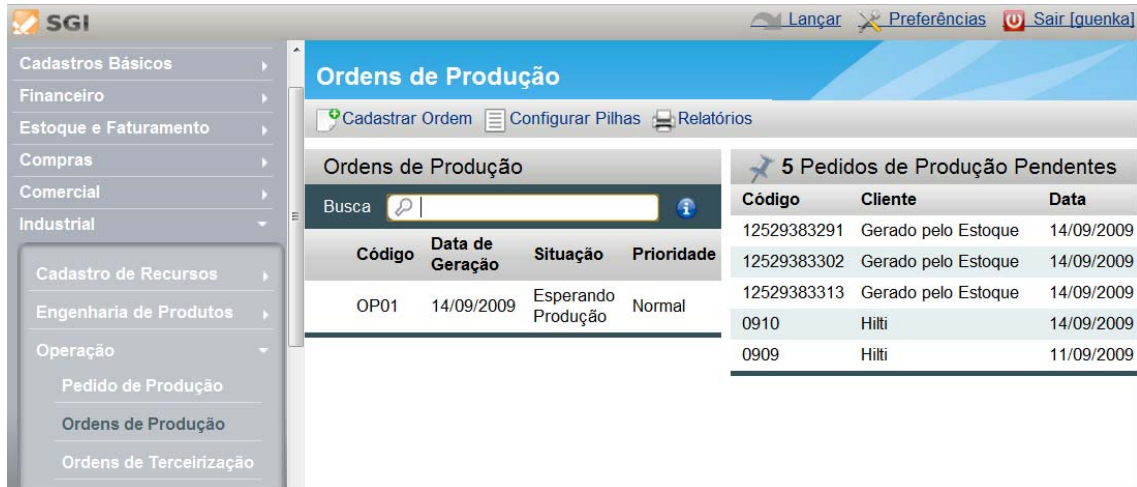
The screenshot shows the 'Composição do produto: Armário 2 portas' (Product Composition: 2-door Cabinet) screen. At the top, there is a 'Copiar composição do grupo' (Copy group composition) button and a 'Voltar' (Back) button. Below this, the 'Combináveis disponíveis' (Available combinations) section includes dropdown menus for 'Acabamento: Todos acabamentos' (Finish: All finishes) and 'Material: Todos materiais base' (Material: All base materials), along with an '+ Adicionar' (Add) button. A table below these dropdowns shows the selected options: 'Acabamento: Todos' and 'Material Base: Todos', with a red 'X' icon in the right column. The 'Processos da Composição' (Composition Processes) section features an 'Adicionar processo' (Add process) dropdown and a 'Projeto' (Project) field with an 'Escolher arquivo' (Choose file) button and the text 'Nenhum a...ecionado'. Below this, four processes are listed: 'APLICAÇÃO DE COLA' (Glue application), 'EMBALAGEM' (Packaging), 'CORTE DE ESPUMA' (Foam cutting), and 'MONTAGEM DE ARMÁRIO' (Cabinet assembly). Each process entry includes a double-headed arrow icon, a 'Detalhes' (Details) button, and a 'Remover' (Remove) button.

A estrutura do sistema permite que o roteiro seja cadastrado por processo ou operação, ou seja, não se restringindo a apenas uma máquina. Isso se deve ao fato de que em empresas de móveis a ocorrência de máquinas em paralelo é muito grande, assim o processo significaria o setor, cabendo ao software de programação o problema de decidir em que máquina será produzida.

Outra vantagem do sistema é que o cadastro de tempos padrões pode ser realizado por produto ou família, o que facilita para empresas como a estudada que tem uma grande variedade de produtos (peças de diversos tamanhos).

Por ser um sistema integrado (ERP) os pedidos já são amarrados com as ordens de produção que por sua vez são amarrados com o estoque. Assim o controle de datas e prazos de cada um pode ser feito de maneira ágil.

Figura 21 – Cadastro de ordens de produção na ferramenta ERP

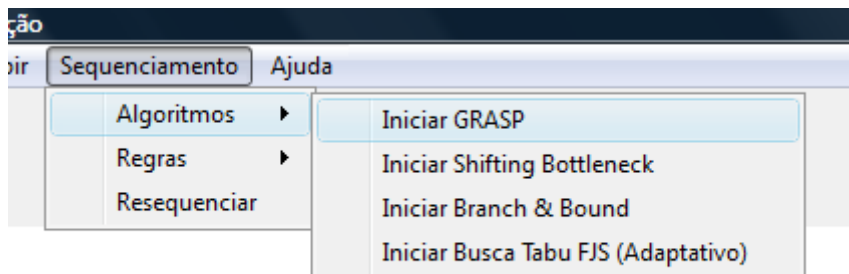


Por critérios comerciais, a ferramenta ERP em questão ficará instalada na empresa estudada somente para os fins do projeto, não havendo a necessidade por parte da empresa em adquirir a licença de uso do software.

4.2.2 Módulo de Sequenciamento de Máquina (MSM)

Desenvolvido ao decorrer deste projeto em parceria com a instituição de fomento Fundação Araucária, a empresa Guenka Software e a Universidade Estadual de Londrina com o propósito de otimizar os recursos fabris através do controle avançado da programação das unidades da produção. Esta ferramenta APS conta com várias técnicas de sequenciamento de operações possibilitando um ambiente de simulação e comparação entre as soluções geradas por cada uma.

Figura 22 – Técnicas de sequenciamento disponíveis na ferramenta APS



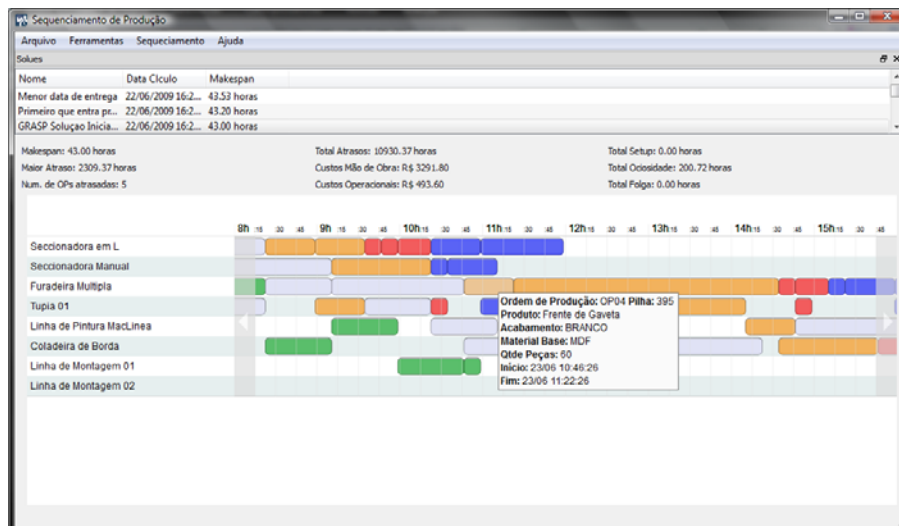
Na interface apresentada na figura a seguir, o usuário pode visualizar os dados cadastrados e/ou importados do banco de dados do ERP. Através dessa interface também é possível alcançar as interfaces para cadastrar, alterar ou excluir dados.

Figura 23 – Visualização dos dados do problema na ferramenta APS

Código	Pilhas	Término	Prioridade
OP1	1	16/11/2009 22:30:41	4
OP1	2	30/12/2009 22:31:15	3
OP2	1	14/01/2010 22:30:58	1

Ao término do sequenciamento, o resultado é exibido para o usuário como um diagrama de Gantt, que é um gráfico de barras que ilustra o cronograma do sequenciamento. O gráfico é gerado em função das máquinas para o tempo, sendo que cada linha corresponde a uma máquina e o tempo avança positivamente da esquerda para a direita. Assim os gomos coloridos representam uma operação de uma ordem de produção alocada numa máquina durante um intervalo de tempo, como na figura a seguir.

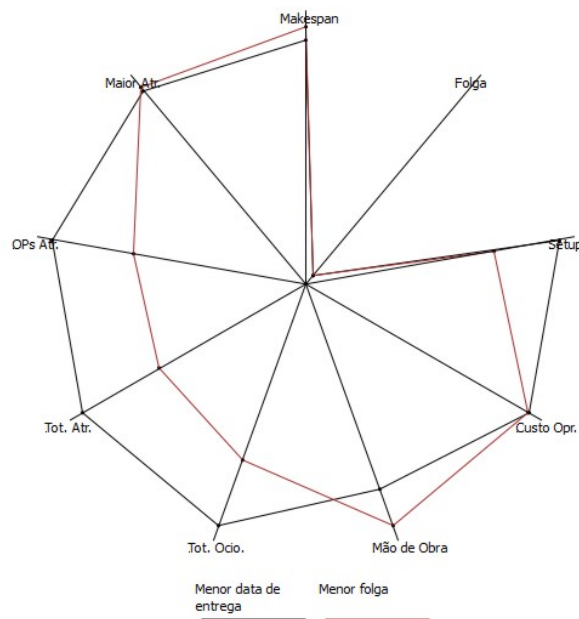
Figura 24 – Gráfico de gantt gerado a partir de uma solução GRASP



Além do diagrama ilustrando o cronograma do planejamento, acima do gráfico estão informações como *makespan* (tempo total de processamento), atraso, custo, etc.

Outro bom recurso disponível na ferramenta é a utilização de nove critérios para comparação das técnicas, disposta em um “gráfico aranha” onde as soluções podem ser comparadas de acordo com estes critérios.

Figura 25 – Gráfico aranha para análise das soluções geradas pela ferramenta APS



Os critérios adotados são:

- **Makespan:** tempo de completude das tarefas, ou seja, período entre o início da primeira tarefa e término da última;
- **Maior Atraso:** maior tempo de atraso de uma ordem de produção;
- **Ordens em atraso:** número de ordens de produção que atrasaram;
- **Total de atraso:** somatória dos tempos de atraso de cada ordem de produção;
- **Total Ociosidade:** somatório de todos os tempos de ociosidade das máquinas;
- **Custo com mão de obra:** somatório total dos custos com mão de obra utilizada para execução do plano (estimativa);
- **Custo operacional:** somatório total dos custos operacionais necessários para execução do plano (estimativa);

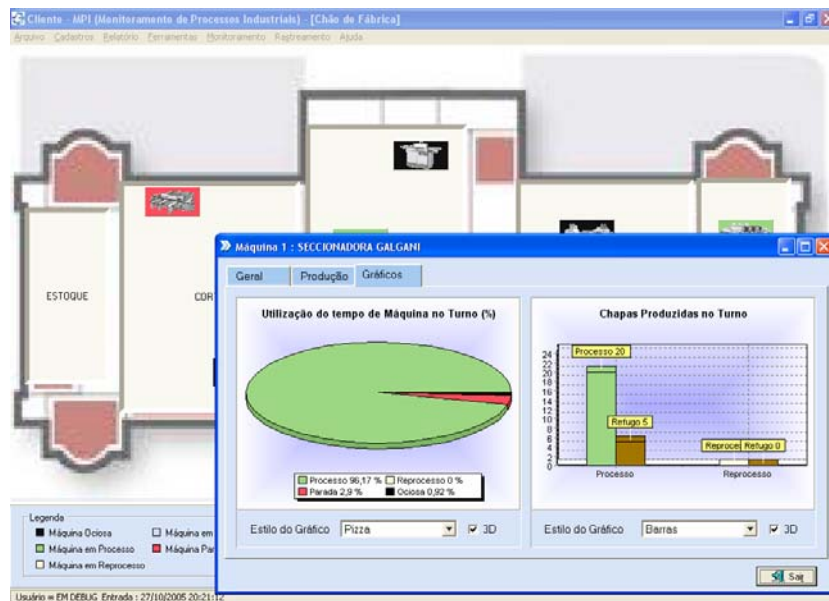
- **Tempo setup:** somatório de todos os tempos de preparação de máquina.
- **Folga:** somatório total dos tempos entre o término da ordem e seu prazo de entrega (caso a ordem seja terminada antes do prazo);

Além das técnicas possíveis, o software ainda permite o resequenciamento manual, através do arrastar do mouse (*drag and drop*). Assim ajustes finais podem ser feitos caso o usuário visualize uma melhor opção.

4.2.3 Sistema de Monitoramento de Processos Industriais (MPI)

A ferramenta utilizada trata-se de uma ferramenta MES com objetivo de atender as necessidades da automação industrial, identificadas a partir da análise do processo produtivo das indústrias do polo moveleiro de Araçatuba- PR.

Figura 26 – Ferramenta de coleta e acompanhamento (MPI)

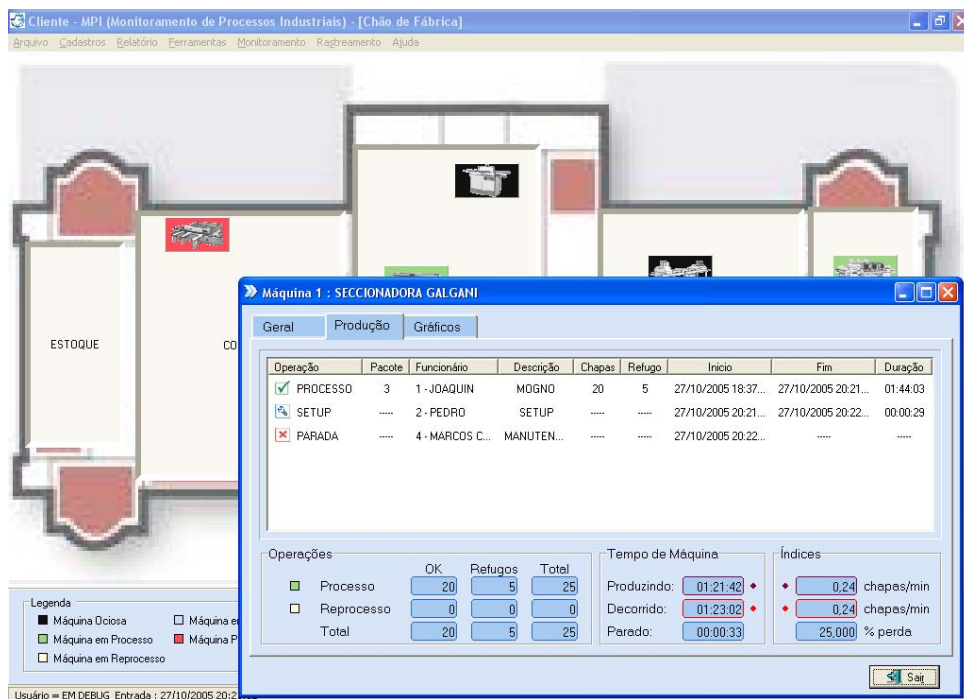


Dentre suas principais funcionalidades estão:

- **Monitoramento de Recursos:** O software exibe telas com a situação em tempo real de máquinas e operadores;
- **Rastreabilidade de Produtos:** Com o auxílio das ordens de produção, importadas do sistema de planejamento, a ferramenta lista por quais máquinas a pilha foi ou está sendo processada e setores por onde ainda deverá passar.

- **Coleta de Dados:** O apontamento de dados é feito por entrada manual de funcionário através de micro terminais ou pontos de monitoramento espalhados pelo chão de fábrica. Há ainda a possibilidade da utilização de CLPs (Controlador lógico programável) para coleta de dados através de sensores ligados diretamente nas máquinas.
- **Relatórios:** Podem-se gerar relatórios relativos à produção, perdas (tempo e materiais) e eficiência de um setor, máquina ou funcionários em um período selecionado pelo usuário (turno, diário, mensal, etc.).

Figura 27 – Monitoramento das máquinas e registros do turno para a máquina selecionada



4.2.4 Sistema de Medição de Desempenho e Melhoria Contínua (SMD/ SMC)

Baseado na metodologia BSC (*Balanced Scorecard*), o ferramenta utilizada permite o acompanhamento do ciclo PDCA através da utilização de indicadores de desempenho.

Os indicadores cadastrados são relacionados aos objetivos que a empresa quer alcançar, assim a evolução nos resultados pode dizer qual a influência de cada indicador na obtenção ou não do objetivo.

Figura 28 – Cadastro de indicadores na ferramenta SMC

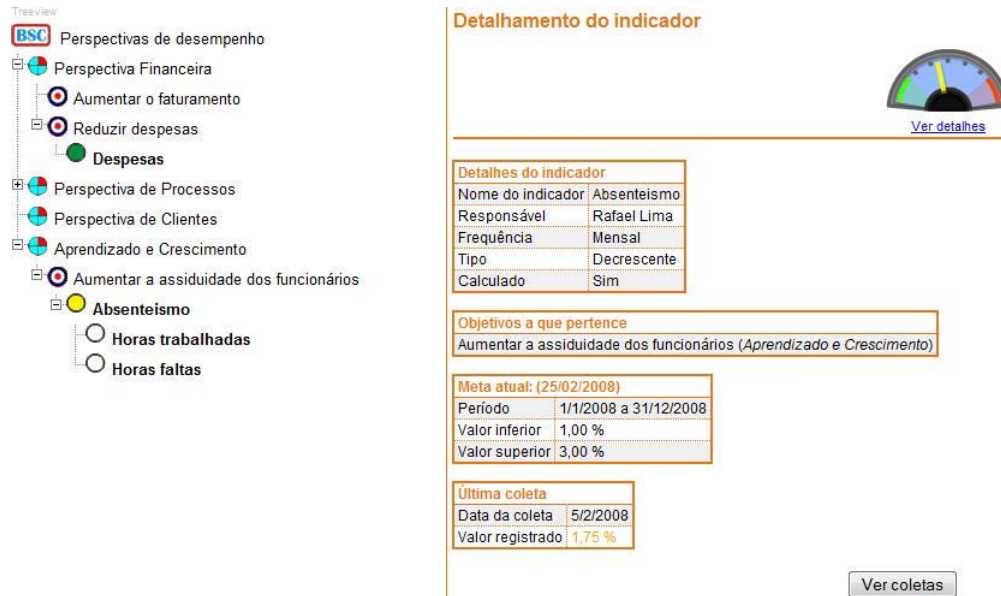
Nome	Frequência	Usuário Responsável			
Absenteísmo	Quinzenal	Administrador do sistema			
Assiduidade	Mensal	Rafael Lima			
Despesas	Mensal	Rafael Lima			
Faturamento	Mensal	Administrador do sistema			
Faturamento mensal	Mensal	Administrador do sistema			
Horas extras	Semanal	Administrador do sistema			
Lucratividade	Mensal	Rafael Lima			
Lucro	Mensal	Rafael Lima			
Margem	Mensal	Rafael Lima			
Produtividade	Indefinido	Administrador do sistema			

Através de dados coletados de forma manual ou com a integração com o sistema MES para indicadores de produção, o SMD permite o acompanhamento de todos aos resultados obtidos e evolução dos mesmos no histórico da empresa.

Figura 29 – Acompanhamento dos Indicadores na ferramenta SMD

Através de um padrão de perspectivas as ações de melhoria são acompanhadas através de um painel conforme figura a baixo para relacionamento dos indicadores com as metas estabelecidas.

Figura 30 – Tela do SMC para acompanhamento dos objetivos cadastrados dividido em perspectivas



4.3 APLICAÇÃO MAP-PROD

Procurou-se aplicar o método proposto na figura 15 para simular três cenários: otimização dos recursos através da utilização da ferramenta APS, processo de adaptação dos parâmetros para as condições do chão de fábrica e o uso de ferramentas de medição de desempenho e melhoria contínua para o gerenciamento do processo de melhoria.

4.3.1 Formulação do Problema

O problema foi formulado com as ordens de produção geradas durante um mês na indústria moveleira utilizando as máquinas presentes no chão fábrica, as mesmas não passaram por nenhum algoritmo de sequenciamento e foram utilizados os indicadores presentes da indústria, estas foram programadas utilizando a ferramenta APS em um horizonte de planejamento semanal. Em cada semana os parâmetros eram atualizados de acordo com as mudanças propostas pelo método. A ferramenta de medição de desempenho e melhoria contínua fornecia o acompanhamento sobre a qualidade da programação preditiva e gerenciamento das mudanças nos padrões de programação.

Devido às dificuldades encontradas para a implantação das ferramentas APS e SMD/ SMC no que tange o tempo de treinamento e mudança de cultura da organização, o estudo teve como foco a utilização da ferramenta de medição de desempenho e melhoria

contínua deixando um pouco de lado a questão de automatização da programação e utilização da sequência gerada pela ferramenta APS.

Com esta restrição no trabalho, optou-se por uma análise simplificada da evolução da programação da produção através do acompanhamento das adaptações geradas para os tempos de *lead time* e processamento dos tempos de produção. Uma melhora nestes fatores poderia significar um ganho significativo em redução de estoques e consequentemente liquidez dos resultados financeiros da empresa.

Considerou-se *lead time* como o tempo entre o início da primeira operação até o término da última operação.

4.3.2 Parametrização Inicial

Como a empresa não tinha um padrão adotado para a programação foi tomado como tempo padrão para cada produto a média dos três meses anteriores a experimentação. Os mesmos três meses foram utilizados para encontrar os melhores parâmetros para α e β utilizados na fórmula 3.1 para atualização dos tempos. Verificando a potencialidade de adaptação para o período analisado, de acordo com a melhor taxa de readequação dos tempos para os meses seguintes foram estabelecidos:

- α = Função que retorna todos os tempos exceto o maior e menor da série
- $\beta = 0,4$

Para medir o desempenho da solução preditiva e o processo de evolução do método adaptativo foram escolhidas as seguintes fórmulas para o cálculo dos indicadores de estabilidade e robustez da solução preditiva:

- O Indicador de Estabilidade foi medido através da média em porcentagem de desvios entre a duração das operações planejadas com a duração das operações executadas.

$$IE = 1 - \frac{\sum_n \left(\frac{|Pp_{t,j} - Rp_{t,j}|}{Pp_{t,j} + Rp_{t,j}} \right)}{n} \quad (4.1)$$

Onde,

$Pp_{t,j}$ = Duração planejada para a ordem t na máquina j
 $Rp_{t,j}$ = Duração real para a ordem t na máquina j
 n = número de operações executadas durante o período

- O Indicador de Robustez foi calculado através da média em porcentagem de desvios entre o *lead time* das tarefas planejadas com o *lead time* das tarefas executadas.

$$IR = 1 - \frac{\sum_m \left(\frac{Pc_l - Rc_l}{Pc_l + Rc_l} \right)}{m} \quad (4.2)$$

Onde,

Pc_l = *Lead time planejado para a ordem l*

Rc_l = *Lead time real para a ordem l*

m = *número de ordens geradas durante o período*

4.3.3 Simulações

Durante este estudo de caso elaborou-se três simulações, sendo a primeira uma análise da aplicação das técnicas de sequenciamento através da ferramenta APS sobre as ordens de produção para a verificação de uma otimização do *lead time* dos produtos. Para isso utilizou-se os tempos coletados durante a execução da produção para uma simulação envolvendo todas as técnicas de sequenciamento disponíveis na ferramenta APS para encontrar uma solução alternativa a praticada pela empresa na qual haveria um ganho significativo no *lead time* das ordens de produção.

Para a segunda procurou-se verificar a adaptação dos parâmetros do método de programação às reais condições dos recursos fabris da empresa, para tal optou-se uma comparação da evolução dos tempos de processamento padrões conforme a análise semanal da produção para os tempos executados no horizonte seguinte, ou seja, os tempos padrões eram atualizados a cada ciclo de planejamento para se alcançar parâmetros mais condizentes com a situação real da empresa para a próxima simulação. Para esta análise foram utilizados os indicadores de estabilidade e robustez conforme demonstrados anteriormente.

Já na terceira simulação verificaram-se os diferenciais na utilização do Sistema de medição de Desempenho e Melhoria Contínua como ferramenta de apoio e gerenciamento deste processo de melhoria do método de programação através da visualização de indicadores e acompanhamento do ciclo PDCA das ações de melhoria geradas durante a adaptação dos parâmetros da programação da produção.

4.4 ANÁLISE DE RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

A averiguação dos resultados conforme comentado se deu em ciclos semanais de produção, conforme a verificação das simulações a seguir.

4.4.1 Simulação de Otimização de Recursos com a Utilização das Técnicas de Sequenciamento e Ferramenta APS

Utilizando a ferramenta APS com as informações de disponibilidade dos recursos, ordens de fabricação e tempos de processamento e *setup* coletados pelo sistema MPI procurou-se simular várias soluções alternativas visando a otimização do *lead time* dos produtos.

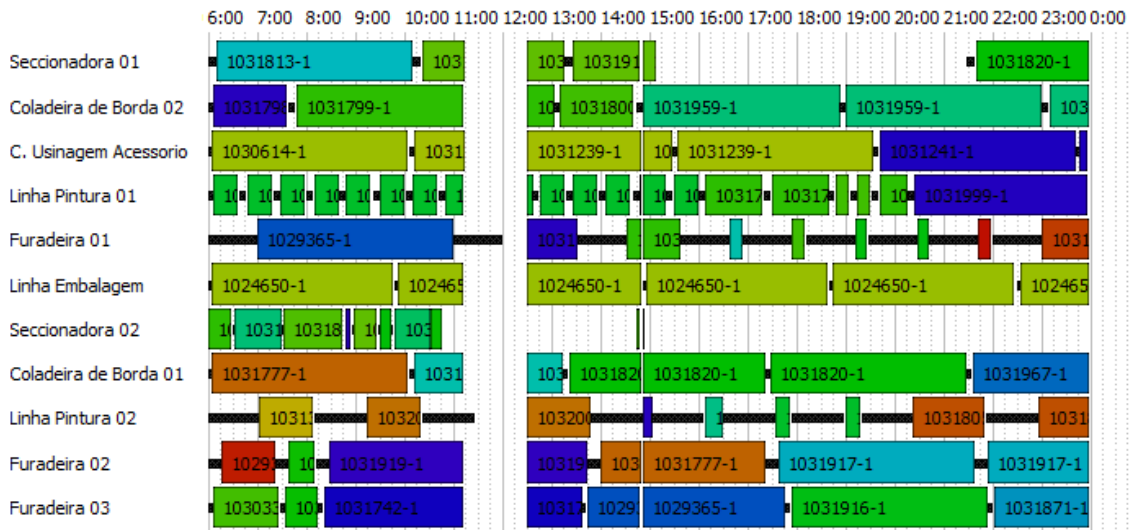
Para não gerar soluções de difícil execução devido a locomoção dos materiais dentro da fábrica, foi adicionado uma restrição temporal de um mínimo de 10 minutos entre uma operação e outra, tempo esse fornecido pelos próprios operadores como tempo mínimo necessário para levar uma pilha de peças de uma célula de trabalho qualquer para a próxima do roteiro.

Foram importados os dados das ordens geradas para a ferramenta APS juntamente com os tempos de processamento e foram executadas as seguintes técnicas de sequenciamento: Regras de despacho (FIFO, Menor Processamento, Menor Prazo de Entrega, Menor Folga e Maior Processamento); *Shifting Bottleneck*⁶; *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* – GRASP; Busca TABU com Algoritmos Genéticos.

Após a simulação dos algoritmos obteve-se inúmeras soluções para comparação segundo o objetivo que era a minimização do *lead time* dos produtos, um exemplo de solução pode ser visto na figura abaixo (um dia de processamento).

⁶ O algoritmo *Shifting Bottleneck* inicialmente considera apenas máquinas isoladas, por isso o algoritmo foi adaptado para considerar os grupos de máquinas presentes no sistema de produção *flexible job shop*.

Figura 31 – Solução gerada pela ferramenta APS para os dados de produção



Para todas as semanas do período de análise verificou-se que a técnica de busca local utilizando algoritmos de Busca Tabu e algoritmos genéticos encontrou as melhores soluções para o objetivo proposto. As soluções encontradas podem ser visualizadas através dos gráficos de gantt conforme figuras abaixo.

Figura 33 – Programação primeira semana (sexta e sábado)

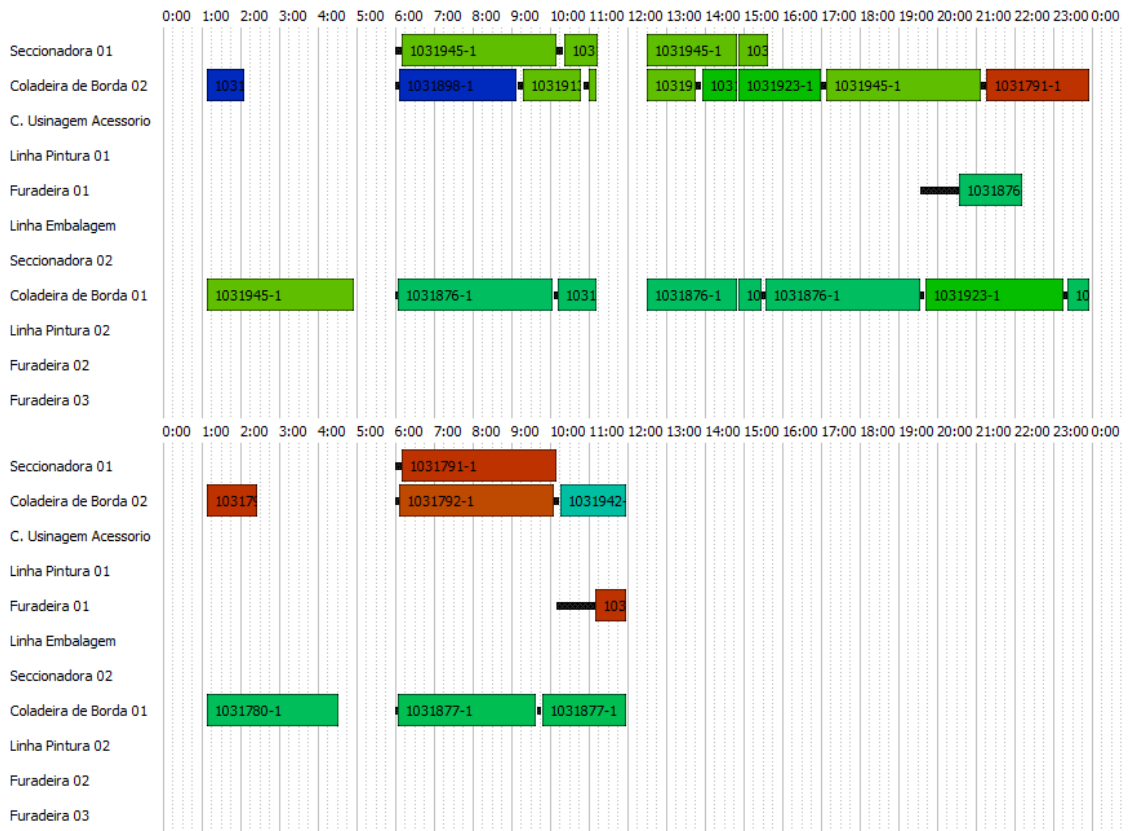


Figura 34 – Programação segunda semana (segunda e terça)

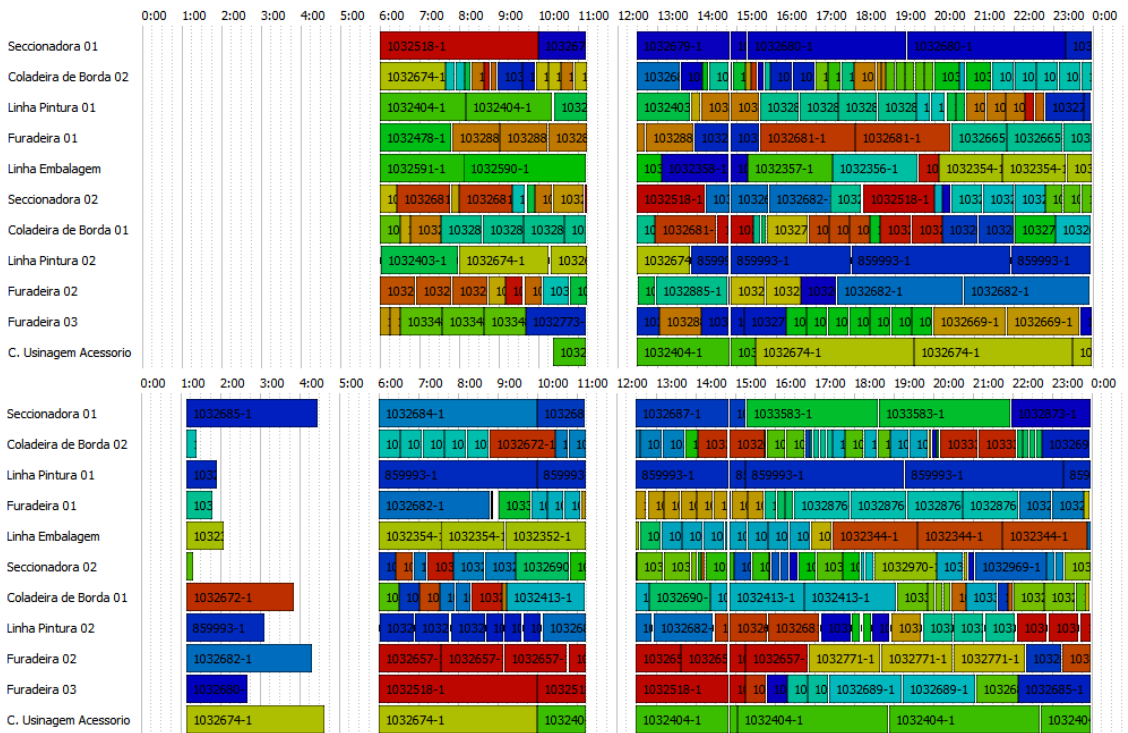


Figura 35 – Programação segunda semana (quarta a sábado)

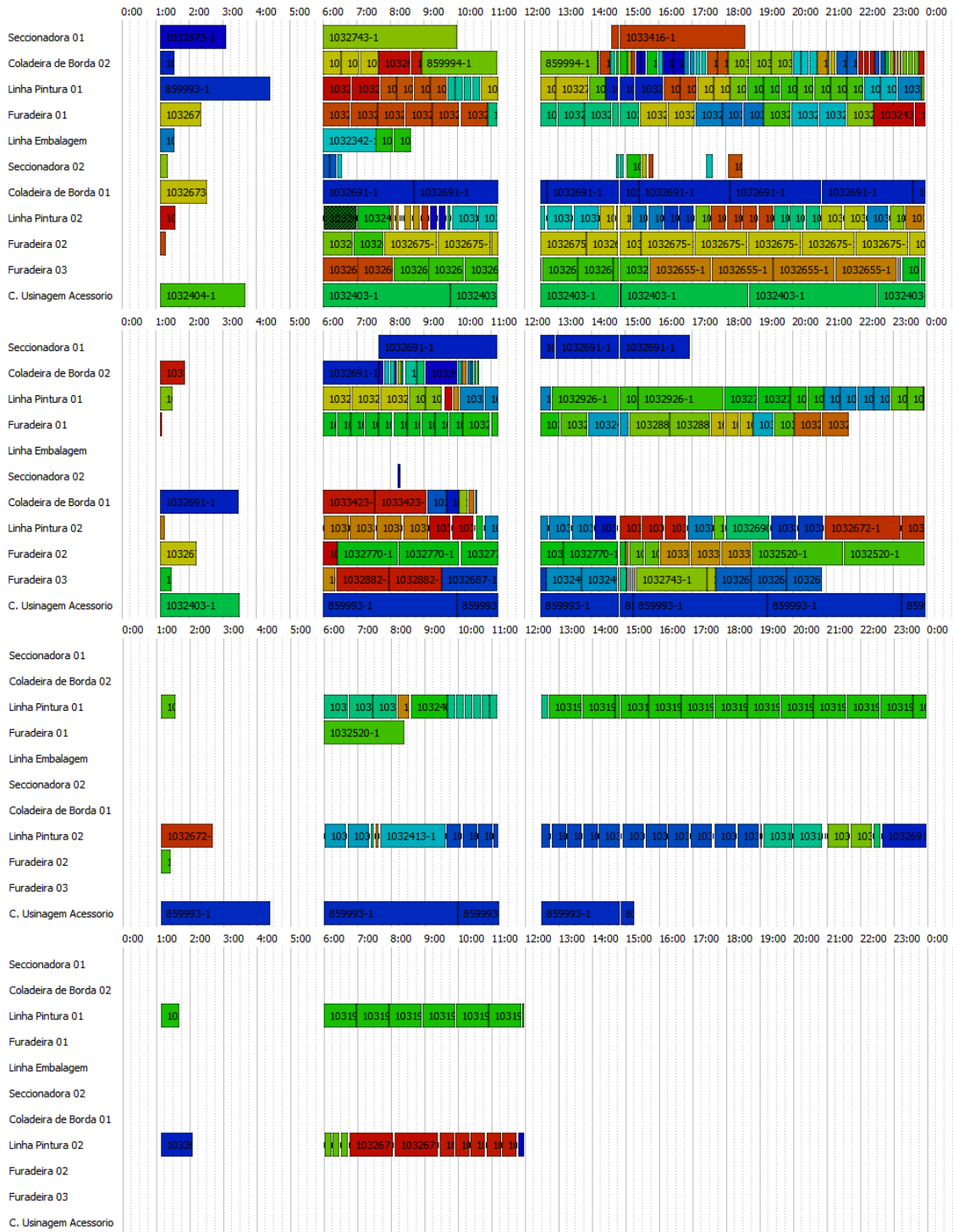


Figura 36 – Programação terceira semana (segunda a quinta)

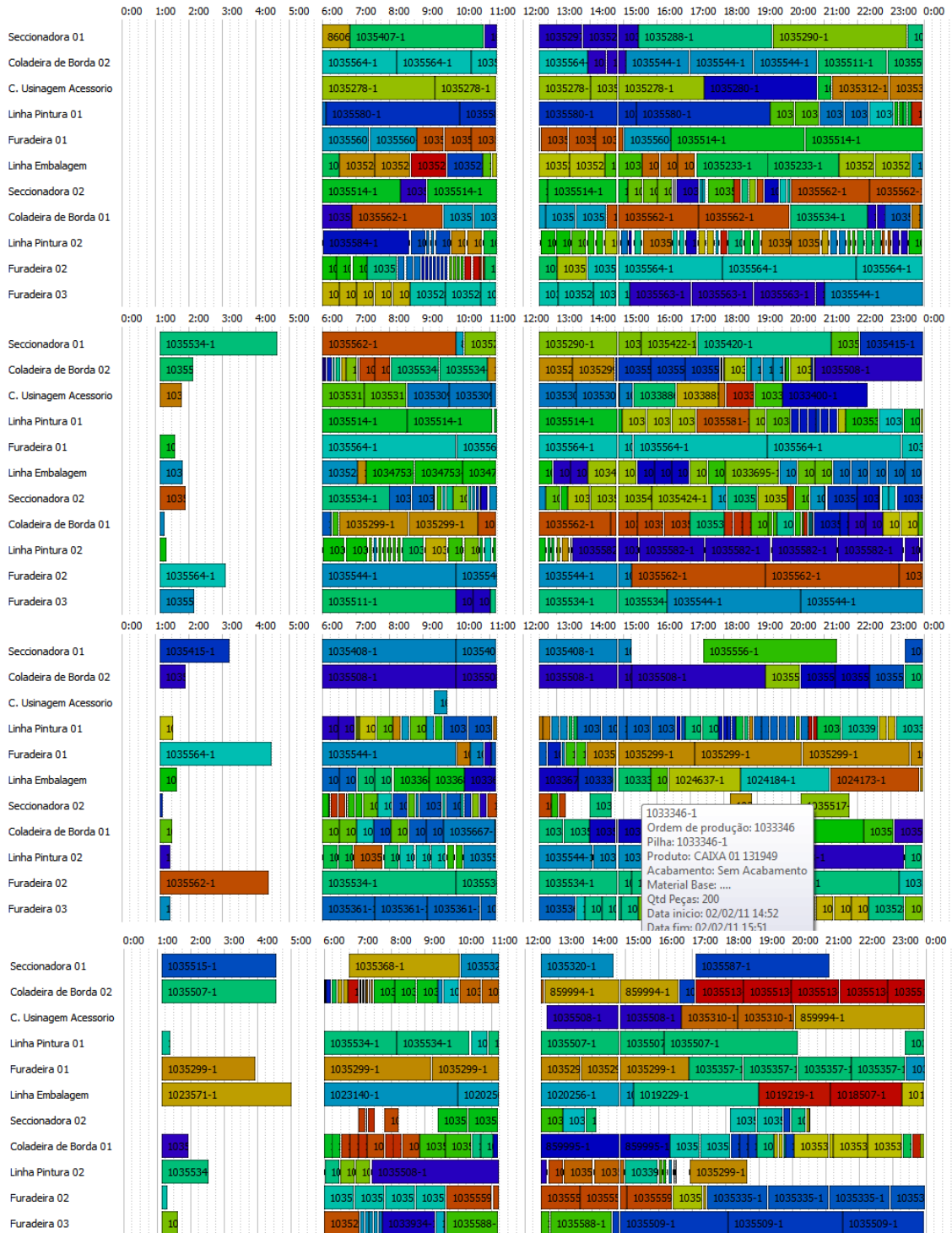


Figura 37 – Programação terceira semana (sexta e sábado)

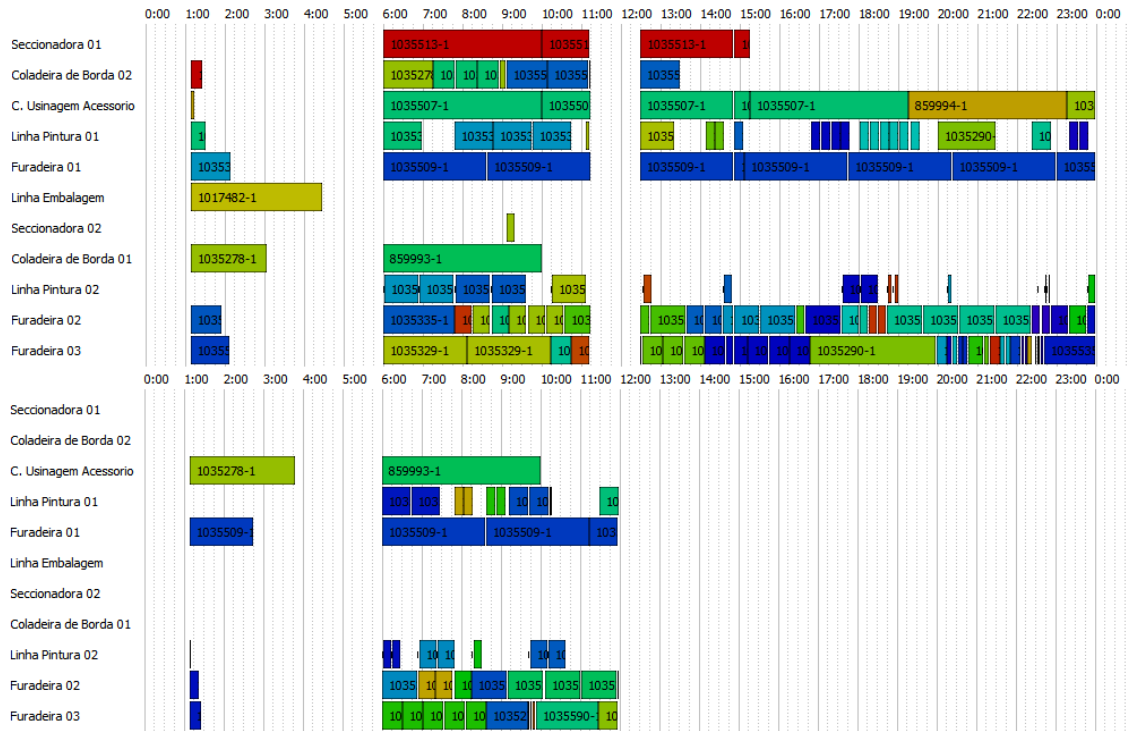


Figura 38 – Programação quarta semana (segunda e terça)

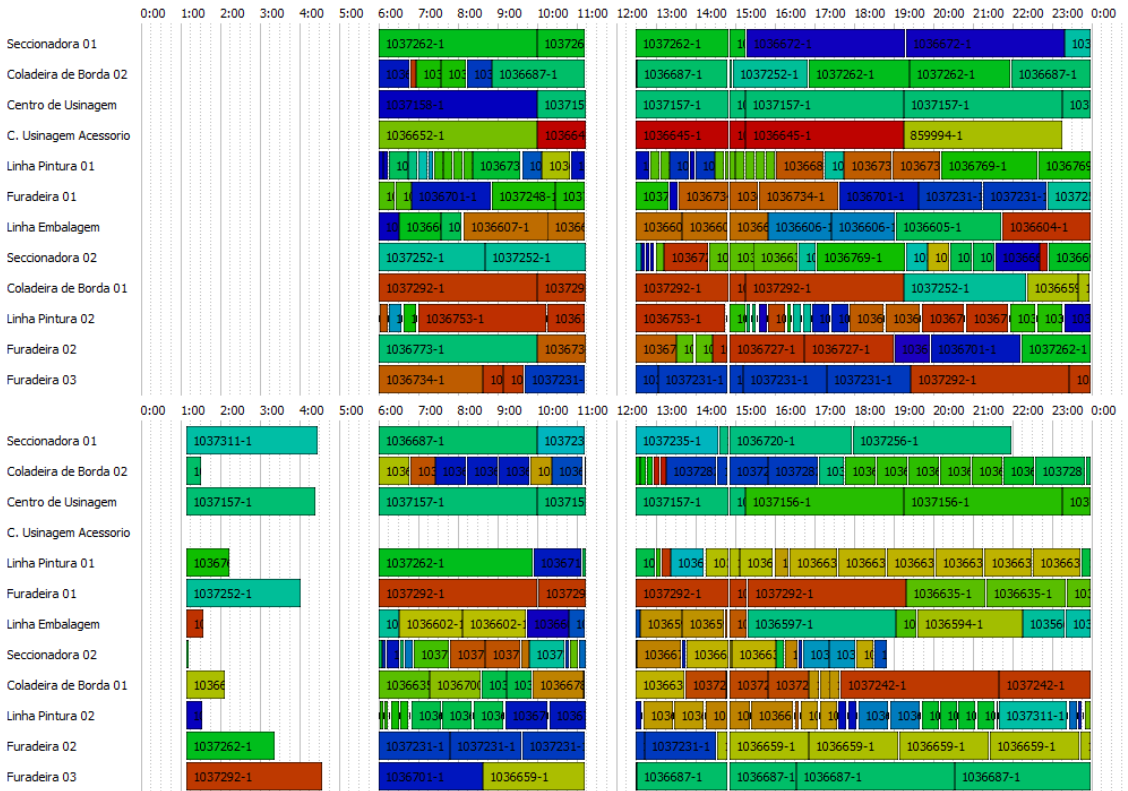


Figura 39 – Programação quarta semana (quarta a sábado)



Na primeira semana encontrou-se um *lead time* médio de 5 horas e 27 minutos, uma diferença de 24,82 % das 7 horas e 15 minutos encontradas durante a execução de 224 ordens de produção num total de 242.586 componentes/produtos. Este ganho

significativo é obtido principalmente pela otimização do algoritmo, mas também pela falta das paradas não previstas acontecidas durante a execução.

Na segunda semana encontrou-se uma solução com *lead time* médio de 6 horas e 29 minutos, uma diferença de 36,23 % das 10 horas e 10 minutos encontradas durante a execução de 448 ordens de produção num total de 514.276 componentes/produtos.

Já na terceira semana foi encontrado uma solução com *lead time* médio igual a 5 horas e 44 minutos, 38,13 % menor que as 9 horas e 16 minutos encontradas durante a execução de 776 ordens de produção num total de 537.558 componentes/produtos.

Por fim na quarta semana foi gerada uma solução com *lead time* médio igual a 7 horas e 22 minutos, uma diferença de 35,29 % das 11 horas e 23 minutos encontradas durante a execução de 1122 ordens de produção num total de 1.098.398 componentes/produtos.

Como pode ser visto a produção durante as quatro semanas variaram bastante, pelo menos se analisarmos somente os números de peças e ordens de produção, porém como os produtos do setor moveleiro são de diferentes tamanhos e complexidade essa diferença pode ser justificada. Contudo a otimização do *lead time* dos produtos é confirmada em todas as semanas de produção, fator esse já esperado devido a enorme quantidade de material parado no chão de fábrica da empresa e do método de programação aplicado para a execução das ordens. O ganho médio das quatro semanas ficou em torno de 36,62%, o que pode indicar fortemente um benefício na utilização da ferramenta APS pela empresa no que tange o estoque em processo e liquidez dos investimentos.

A implantação da ferramenta de forma completa, com a execução da produção orientada pela solução preditiva da ferramenta possibilitaria a verificação e validação de outros objetivos como minimização de custos operacionais e *makespan* da produção, objetivos estes também esperados com a utilização da ferramenta APS.

4.4.2 Simulação de Adaptação do Método de Programação

Para verificar a adaptação dos parâmetros optou-se por uma atualização dos tempos padrões utilizados a cada ciclo do planejamento de acordo com os tempos coletados nas semanas anteriores, verificando assim se a solução gerada para cada semana se assemelha mais ao executado com os tempos atualizados.

Para esta verificação utilizou-se os mesmos dados das semanas utilizadas na outra simulação, porém para a simulação da segunda semana aplicou-se a fórmula 3.1 com os

parâmetros α = Função que retorna todos os tempos exceto o maior e menor da série e $\beta = 0,4$ com tempos coletados na primeira semana gerando uma diferença nos tempos padrões utilizados para a simulação da ferramenta APS. Para a simulação da terceira semana utilizou-se os dados coletados nas duas primeiras semanas e assim por diante. O resultado desta simulação pode ser vistos nos gráficos de gantt gerados pela ferramenta APS e exibidos nas figuras a seguir.

Figura 40 – Programação da segunda semana utilizando tempos padrões ajustados de acordo com coleta de dados da primeira semana (segunda e terça).

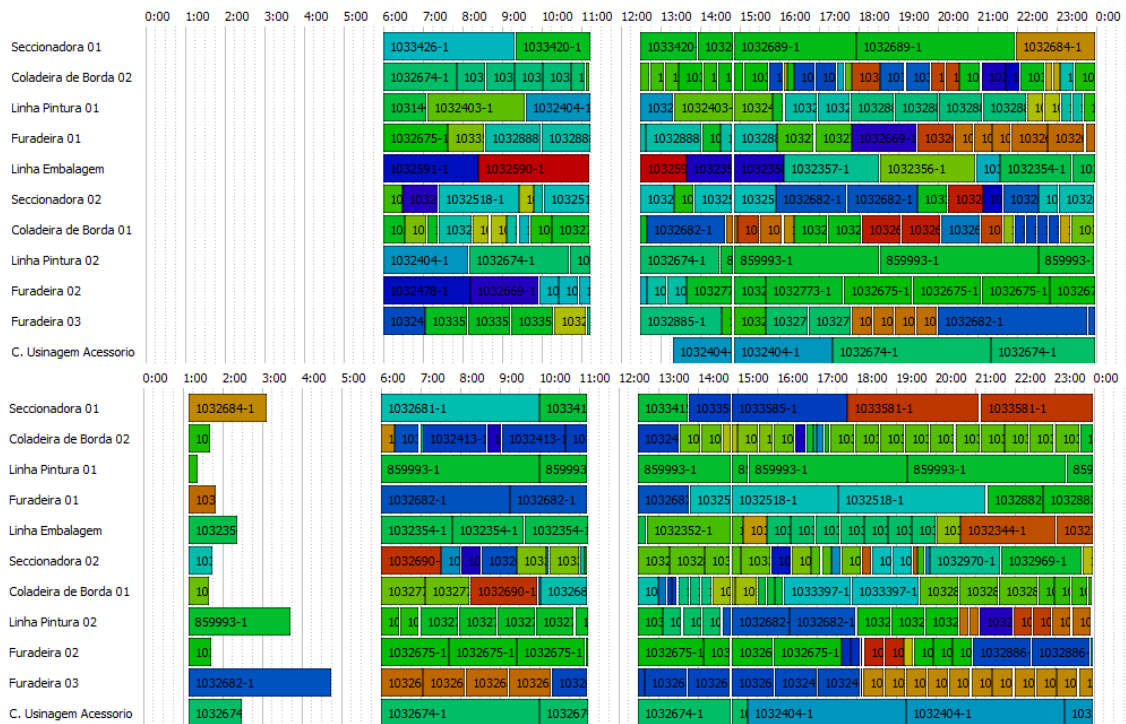


Figura 42 – Programação da terceira semana utilizando tempos padrões ajustados de acordo com coleta de dados da primeira e segunda semanas (segunda a quinta).

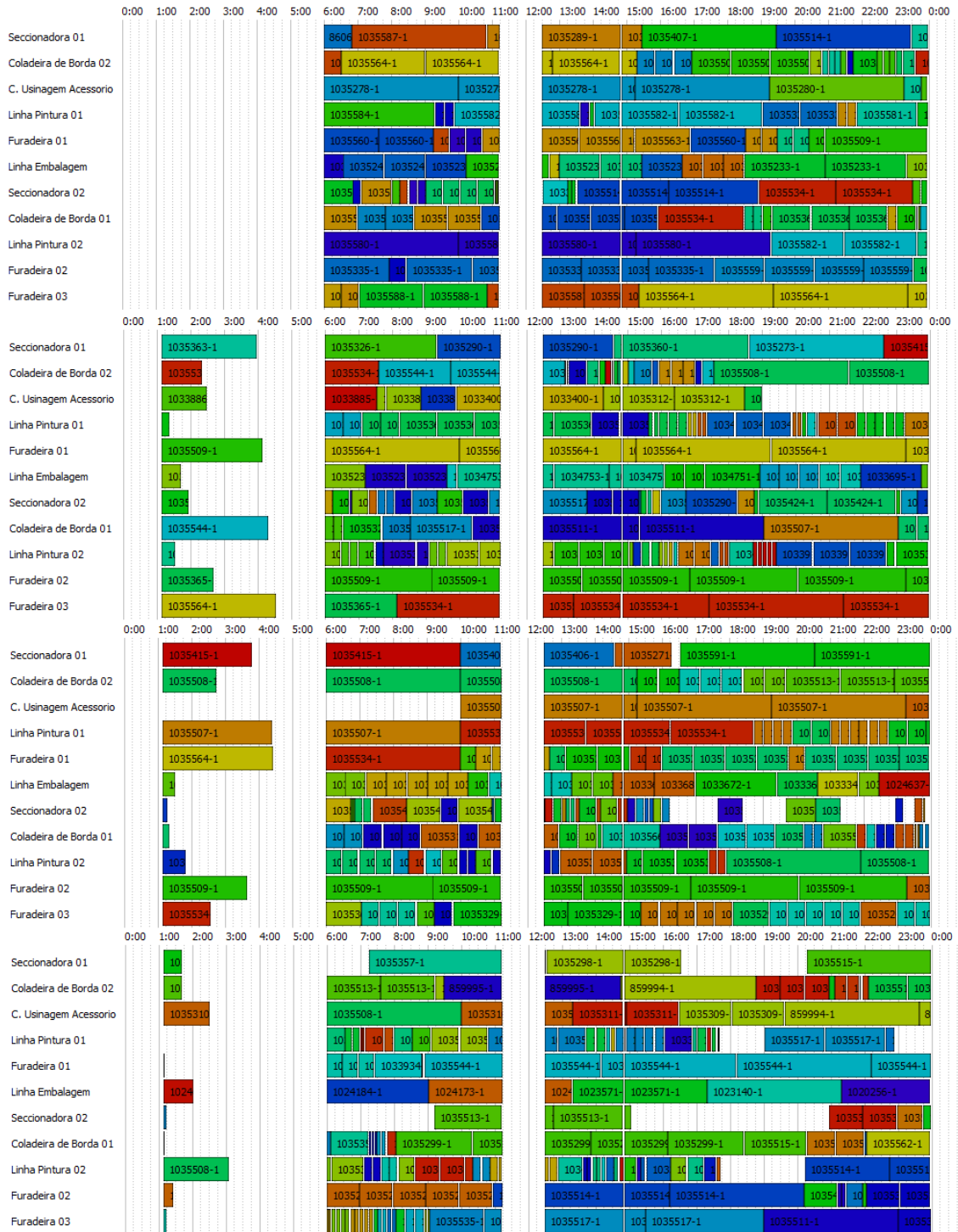


Figura 43 – Programação da terceira semana utilizando tempos padrões ajustados de acordo com coleta de dados da primeira e segunda semanas (sexta e sábado).

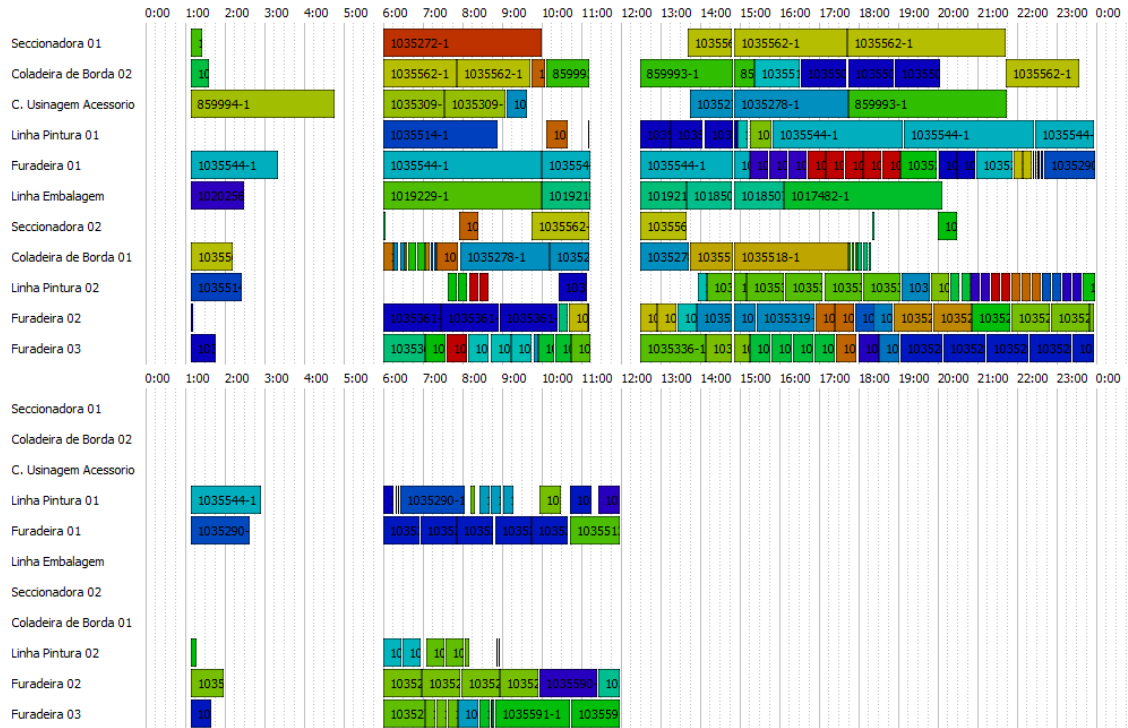


Figura 44 – Programação quarta semana utilizando tempos padrões ajustados de acordo com coleta de dados da primeira, segunda e terceira semanas (segunda e terça).

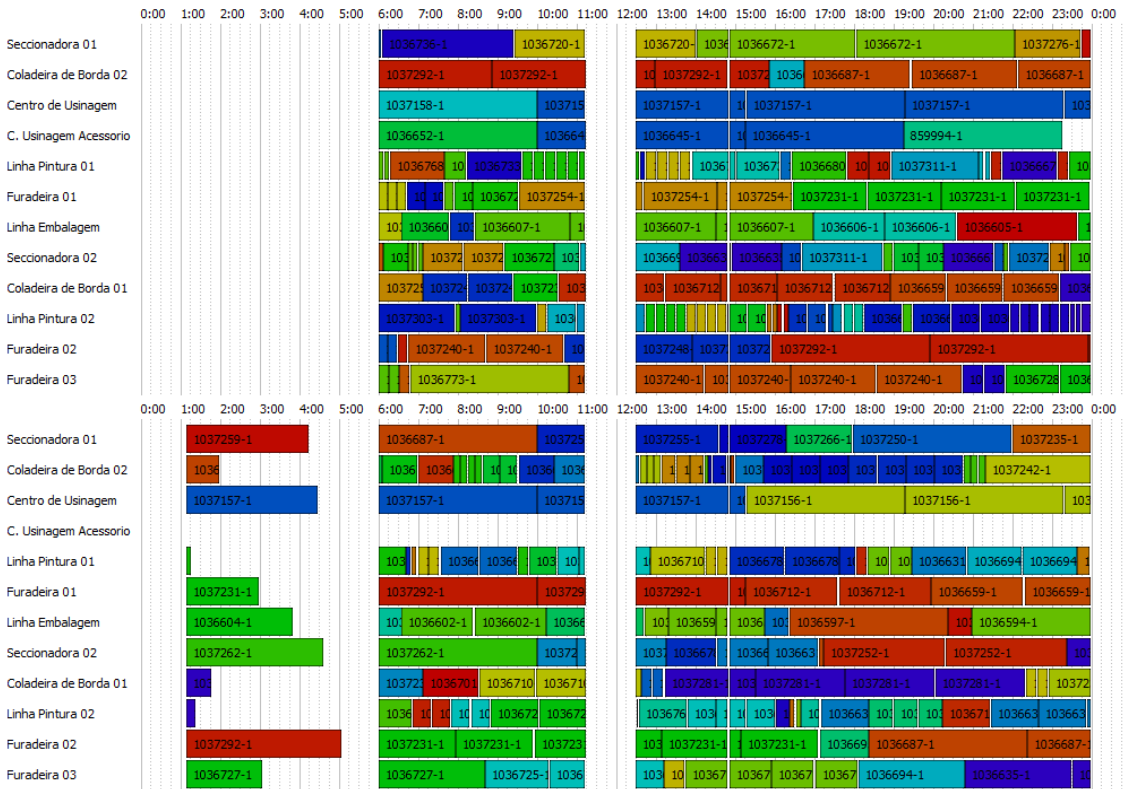
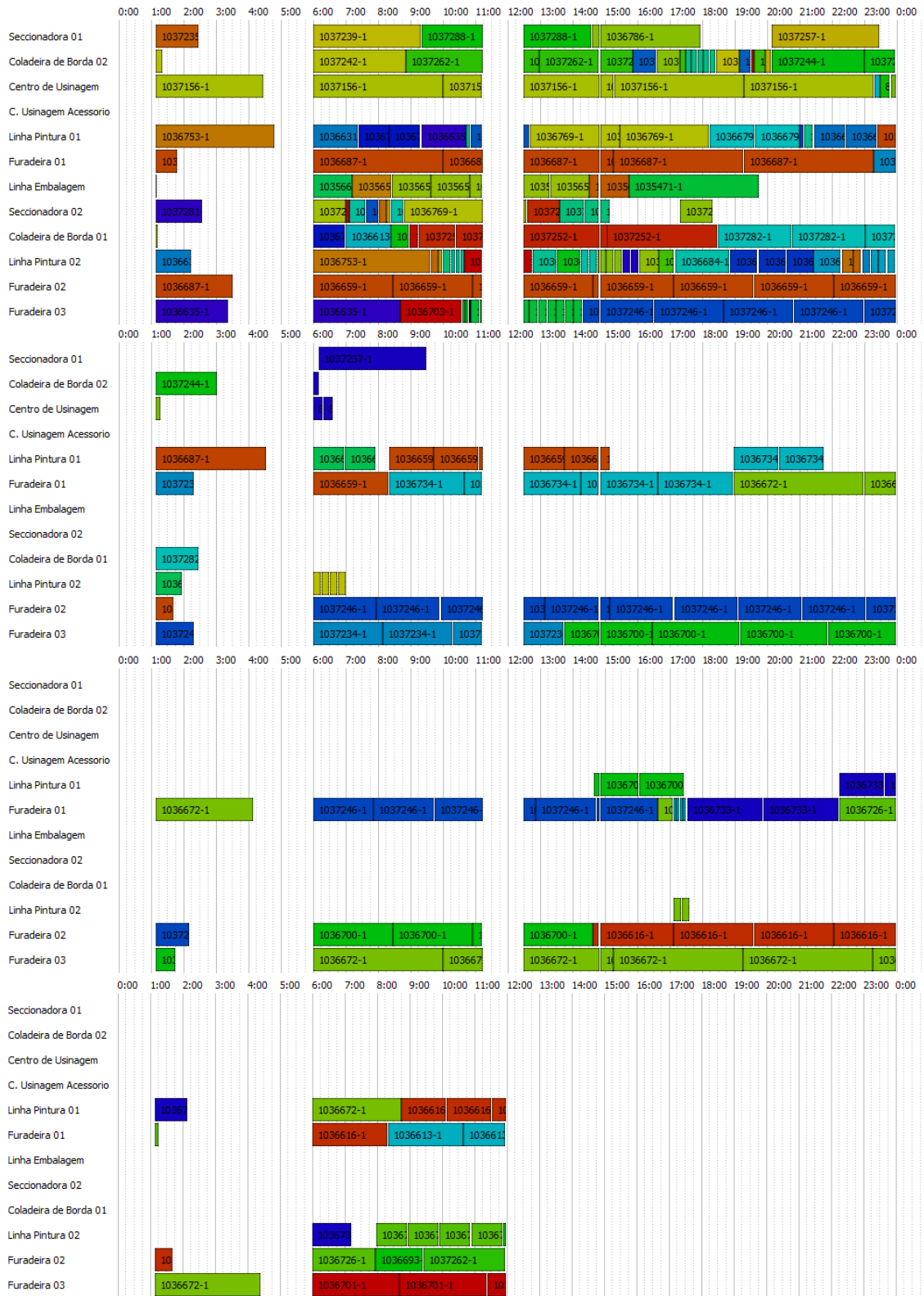


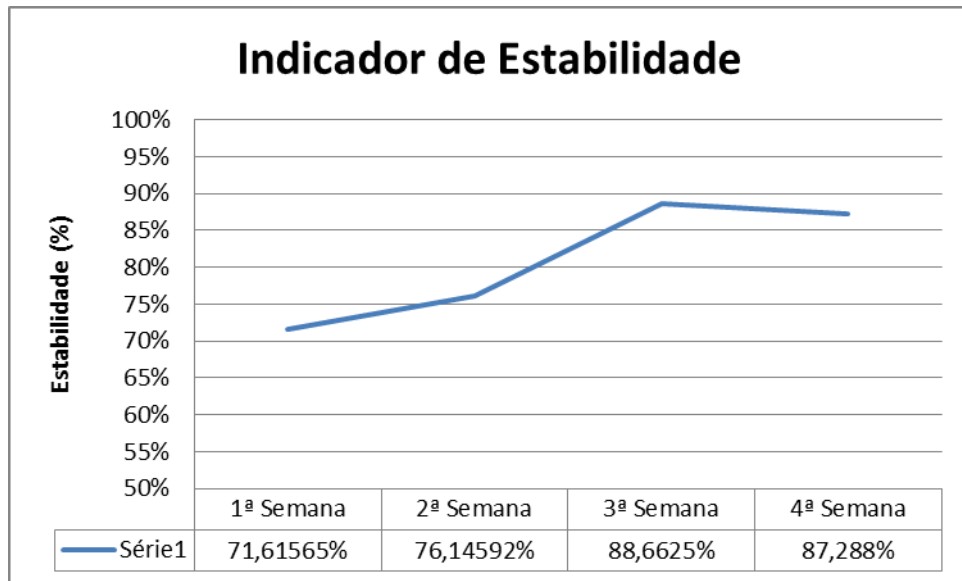
Figura 45 – Programação quarta semana utilizando tempos padrões ajustados de acordo com coleta de dados da primeira, segunda e terceira semanas (quarta a sábado).



Para averiguar e mensurar a adaptação dos tempos para a geração das soluções preditivas utilizou-se os indicadores de estabilidade e robustez já demonstrados

anteriormente. Nos resultados pode-se verificar a aproximação dos valores referentes aos tempos padrões ajustados com os tempos praticados nas semanas seguintes a adaptação, indicação mostrada através da ascensão do indicador de estabilidade que passou de 71,61% na primeira semana para 87,28 na quarta semana.

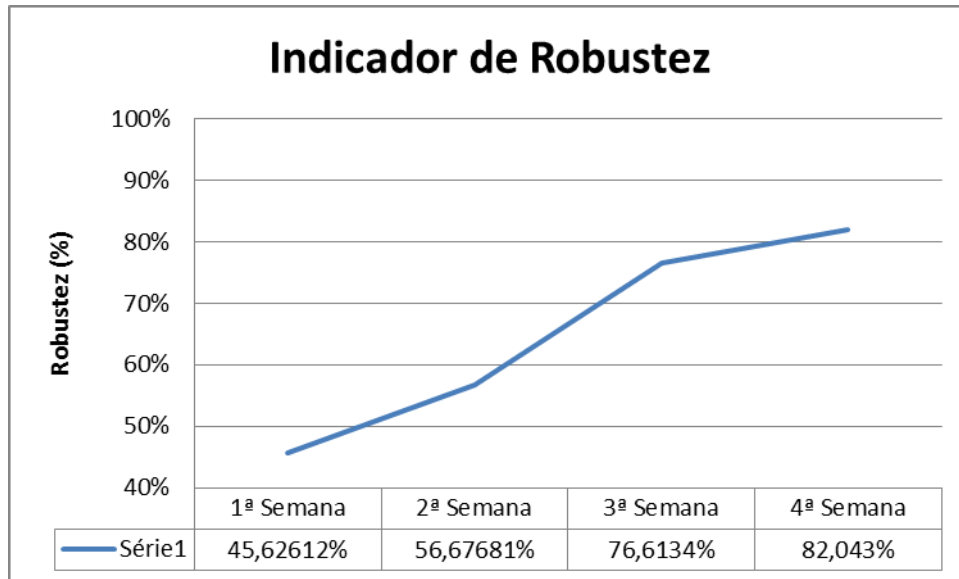
Gráfico 1 – Resultado para o indicador de Estabilidade do estudo de caso



Com a aproximação dos tempos padrões do planejamento aos tempos da produção percebe-se também a melhora no indicador de robustez, mostrando que a qualidade solução preditiva gerada relacionada ao *lead time* dos produtos para o período aproxima-se mais da qualidade do executado no chão de fábrica.

Para o indicador de robustez tem-se uma melhora constante durante o mês de análise saindo de um valor de 45,62% na primeira semana para 82,04% ao final do mês.

Gráfico 2 – Resultado do indicador de Robustez para o estudo de caso



A evolução dos indicadores provavelmente deve tender para uma situação estável quando os parâmetros atingirem valores próximos aos ideais para utilização da ferramenta APS, provavelmente esta aproximação poderia ser verificada em um período maior de experimentação.

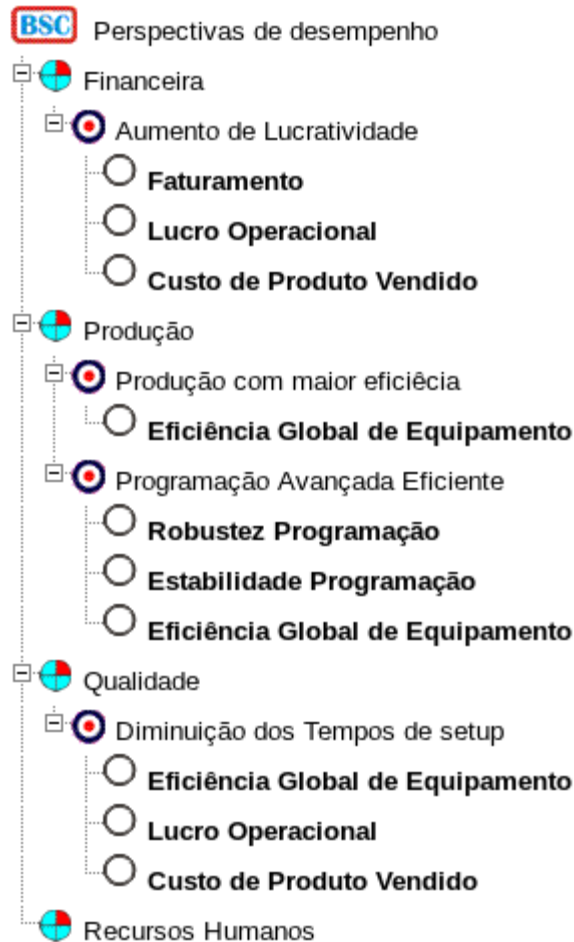
4.4.3 Simulação de Utilização do Sistema de Medição de Desempenho e Melhoria Contínua como Apoio ao Gerenciamento do Processo Evolutivo

Já na terceira simulação verificou-se a inserção das ferramentas de medição de desempenho e melhoria contínua no processo adaptativo de programação da produção, para isso parametrizou-se as ferramentas através do modelo BSC (*Balanced Scorecard*) proposto pela ferramenta escolhida com o cadastro de diferentes perspectivas e objetivos da empresa.

Esta ferramenta tem como objetivo o uso pro todo o grupo de colaboradores da empresa abrangendo os diversos departamentos e formas de desempenho organizacional.

Para este estudo de caso optou-se pelo uso de poucos indicadores além dos relacionados anteriormente para a análise da segunda simulação, o ideal era ter indicadores em diferentes perspectivas e que representasse todos os objetivos da empresa. Como pode ser visto na figura a seguir temos uma organização dos indicadores de desempenho através destas perspectivas e objetivos para facilitar a análise.

Figura 46 – Estrutura baseada na metodologia BSC da ferramenta de Medição de Desempenho e Melhoria Contínua

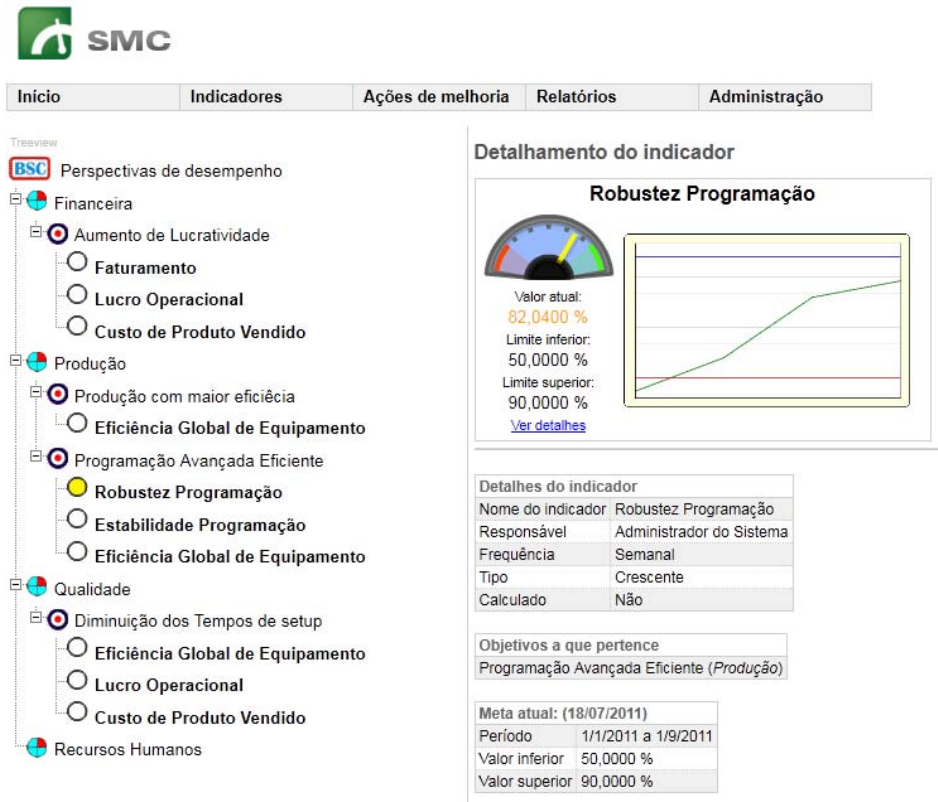


A ferramenta se demonstrou bem prática e muito útil para a visualização dos resultados e análise dos dados coletados, além de gerenciar de forma colaborativa (alocação de responsáveis e acesso restrito por perfil de acesso) a coleta de indicadores quantitativos e qualitativos através de digitação manual ou importação de arquivos.

Para facilitar a visualização dos valores, a ferramenta utiliza-se de gráficos e uso de cores indicativas de desempenho que são calculadas através do cadastro de limites inferiores e superiores e metas por período.

O acompanhamento dos indicadores e análise dos resultados orientados por objetivos se demonstrou eficaz e pode uma ferramenta de uso comum entre todos os departamentos por ter uma linguagem fácil e bem visual como por ser visto na próxima figura.

Figura 47 – Painel de Desempenho do Indicador de Robustez



Outra funcionalidade do sistema referente ao ciclo de melhoria continua é o cadastro e gerenciamento das ações de melhoria propostas na empresa, acompanhando o ciclo PDCA a ferramenta aloca aos responsáveis a execução das ações e acompanha o resultado das mesmas nos indicadores relacionados.

A análise para manutenção ou não destas ações ainda ficam mais fáceis através da utilização dos relatórios de causa e efeito que a ferramenta proporciona.

Neste estudo de caso as adaptações utilizadas foram às atualizações nos tempos padrões para utilização na ferramenta APS. A tela de cadastro de uma delas por ser vista na figura abaixo.

Figura 48 – Painel de gerenciamento e acompanhamento das adaptações do modelo de programação (ações de melhoria)

Detalhamento da ação de melhoria

Dados da ação de melhoria	
Nome	Atualização dos tempos padrões de pro
Data de inicio	09/04/2011
Data de término (prevista)	16/04/2011
O que?	Atualização dos tempos parões de produção
Por que?	para permitir uma análise mais correta do software APS de programação, otimizando assim o planjemaneeot da produção
Quem?	Administrador do Sistema
Como?	excel, APS
Indicadores relacionados	<ul style="list-style-type: none"> • Robustez Programação • Estabilidade Programação • Eficiência Global de Equipamento

Mesmo este estudo de caso não conseguindo colocar em prática todas as características do método proposto, ele serviu como base para estimar os benefícios que a utilização dos sistemas de medição de desempenho e melhoria contínua pode trazer ao processo de adaptação do método. Validando assim o potencial do método e uma forma de utilização das técnicas que o envolvem.

4.5 CONSIDERAÇÕES

Em parceria com as instituições Fundação Araucária, Universidade Estadual de Londrina e a empresa Guenka Software, foi desenvolvido uma ferramenta do tipo APS para utilização de várias técnicas de sequenciamento e simulação de diferentes situações na indústria. Este sistema ainda permite a integração com outros sistemas (ERP, MES, SMD e SMC) para utilização do método adaptativo em questão.

A facilidade em utilização do método adaptativo com as ferramentas estudadas para programação da produção pode solucionar a dificuldade de estabelecimento de parâmetros de sequenciamento e conseqüentemente favorecer o aumento na utilização de ferramentas do tipo nas indústrias nacionais.

Este trabalho teve seu foco em aplicação das ferramentas de programação da produção abrindo espaço para novos estudos para adequação e simulação dos algoritmos em ambientes reais.

Com os resultados das simulações realizadas neste trabalho encontrou-se outra empresa interessada em aplicar o método MAP-Prod, uma empresa do setor metal-mecânico se predispôs a implantar as ferramentas descritas, cuja integração já está desenvolvida. O projeto de implantação do método nesta empresa deve levar 20 meses e deve servir como validação do método proposto além de trazer novas questões relacionadas a aplicação do mesmo.

5 CONCLUSÃO

O ambiente competitivo onde as empresas se encontram exige cada vez mais reduções de custos e melhorias no atendimento ao cliente. Isso faz com que as indústrias invistam cada vez mais em tecnologia para aperfeiçoamento de seus processos.

O mercado exige cada vez mais de uma indústria de manufatura produtos personalizados e menores prazos de entrega, com isso a aplicação de uma ferramenta de programação avançada de produção (APS) pode trazer inúmeros benefícios. Além de um ambiente de simulação, a ferramenta pode proporcionar ganhos com a otimização dos recursos e prazos mais confiáveis.

Várias técnicas para o sequenciamento de operações já foram desenvolvidas, algumas baseadas em heurísticas, outras em redes neurais ou buscas locais; porém pouco se têm aplicado em ambiente nacional. A falta de ferramentas comerciais, pouca maturidade das empresas quanto a tecnologias aplicadas ao PPCP e a dificuldade em parametrização das técnicas de sequenciamento contribuem para essa ausência de ferramentas nas empresas.

A integração entre as ferramentas presentes no MAP-Prod pode ser realizada com o intuito de viabilizar o método além de trazer inúmeros benefícios para a análise de informações da empresa, porém a maioria das ferramentas disponíveis no mercado necessitam de esforços adicionais para sua comunicação com os demais, já que envolvem muitas vezes a comunicação entre sistemas de diferentes tecnologias e diferentes direitos autorais, tornando assim uma tarefa complexa para as empresas que a adquirem.

A proposta utiliza ferramentas já conhecidas no âmbito da Engenharia de Produção, algumas não são muitas disseminadas no mercado (SMD/SMC, APS), mas se as empresas tivessem acesso e entendessem os ganhos consideráveis com a integração conforme apresentado, mais empresas investiriam nestas soluções. Uma empresa de software que tenha todas estas ferramentas e as disponibilizasse já integradas teria um espaço melhor no mercado dessas soluções.

O método adaptativo proposto pelo presente trabalho pode solucionar o problema da dificuldade de parametrização dos métodos aplicando um ciclo de adaptações nos dados de entrada para o sistema de programação da produção condicionando as técnicas de sequenciamento a gerar sempre soluções mais compatíveis com a situação produtiva da empresa.

Outra grande vantagem do método adaptativo são as frequentes correções realizadas para adequar o método as mudanças normais de um processo fabril como: produção de novos produtos; aquisição ou troca de equipamentos; rotatividade de funcionários; e mudanças no processo de fabricação.

Esta aproximação do método à situação real dos recursos produtivos pode ser realizada através da adequação dos tempos padrões, ajuste dos limites da margem de segurança de material em cada etapa, seleção da técnica de sequenciamento utilizada e até mesmo a alteração nos critérios de seleção para as soluções do sequenciamento.

Metodologias como a medição de desempenho e melhoria contínua são essenciais para acompanhar esse processo evolutivo, garantindo o gerenciamento do método. Além de trazer inúmeros benefícios inerentes às metodologias [1] [6] [17].

5.1 TRABALHOS FUTUROS

A utilização de técnicas de sequenciamento reativas pode trazer novas possibilidades para o método adaptativo, podendo utilizar a medição de desempenho baseado na quantidade e tipo das reações que foram feitas durante a execução do planejamento.

Tanto a ampliação problema para novas situações quanto o planejamento de manutenções preventivas e tratamento de interrupções podem ser incrementadas ao modelo levando assim o método a novas aplicações.

REFERÊNCIAS

- [1] ATTADIA, Lesley Carina do Lago; MARTINS, Roberto Antonio. Medição de desempenho como base para evolução da melhoria contínua. *Prod.* [online]. 2003, vol.13, n.2, pp. 33-41. ISSN 0103-6513.
- [2] AKYOL, D. E.; BAYHAN, G. M. 2007. A review on evolution of production scheduling with neural networks. *Comput. Ind. Eng.* 53, 1 (Aug. 2007), 95-122. DOI=<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2007.04.006>
- [3] AYTUG, Haldun et al. Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions. **European Journal Of Operational Research**, p. 86-110. 2005.
- [4] BASGALUPP, M. P. LEGAL-Tree: Um algoritmo genético multi-objetivo lexicográfico para indução de árvores de decisão. Tese (Doutorado) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – ICMC-USP, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- [5] BERGAMASCHI, S. Um Estudo sobre projetos de implantação de Sistemas para Gestão Empresarial. 181 p. Dissertação (Mestrado)—Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- [6] BESSANT, J.; CAFFYN, S.; GILBERT, J.; HARDING R.; WEBB, S. Rediscovering continuous improvement. *Technovation*. Vol. 14. No.1, 1994.
- [7] BIDOT, J.; VIDAL, T.; LABORIE, P. BECK, J. C. A theoretic and practical framework for scheduling in a stochastic environment. *Journal of Scheduling*, vol 10, 2009.
- [8] BILLAUT, J. C.; MOUKRIM, A.; SANLAVILLE, E. Introduction to Flexibility and Robustness in Scheduling. Ed. ISTE. 2010
- [9] BOND, T. C. The role of performance measurement in continuous improvement. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 19, n. 12, p. 1318-1334, 1999.
- [10] CAMPOS, V.F. *TQC: Controle da qualidade total (no estilo japonês)*. 2. ed. Fundação Christiano Ottoni, EE-UFGM. Belo Horizonte, 1992.
- [11] COELLO, C. A., Lamont, G. B., and Veldhuizen, D. A. 2006 *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems (Genetic and Evolutionary Computation)*. Springer-Verlag New York, Inc.
- [12] CORRÊA, H. L. et al. *Planejamento, Programação e Controle da Produção: MRP II / ERP*. São Paulo: Atlas, 1997.
- [13] DAVENPORT, T. H. Putting de enterprise into the enterprise system. In: *Harvard Business Review*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 121–131.
- [14] ENGLAND. Department of Trade and Industry. *Finite capacity scheduling: an introductory guide for manufacturers*. London, 2002. 16 p.

- [15] ERHART, A. Sistemas Avançados de Programação da Produção: uma aplicação na indústria moveleira. Porto Alegre: UFRGS, 2006.
- [16] FREITAS, A. A. (2004). A critical review of multi-objective optimization in data mining: a position paper. SIGKDD Explorations, 6(2):77-86.
- [17] GEROLAMO, M. C. Proposta de sistematização para o processo de gestão de melhorias e mudanças de desempenho. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- [18] GLOVER, F.; LAGUNA, M. Tabu Search, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA. 1997.
- [19] GOLDBERG, D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. EUA: Addison-Wesley, 1989.
- [20] HADJIMICHAEL, B. Manufacturing Execution Systems Integration and Intelligence. Dissertação (Mestrado). McGill University, Montreal, 2004.
- [21] HERROELEN, Willy; LEUS, Roel. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. **European Journal Of Operational Research**, p. 289-306. 2005.
- [22] HOPFIELD, J. J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. Proceedings of National Academy of Sciences, 79, 2554–2558. 1982.
- [23] LAMBRECHTS, O.; DEMEULEMEESTER, E.; HERROELEN, W. **Proactive and reactive strategies for resource-constrained project scheduling with uncertain resource availabilities**. Journal of Scheduling, Volume 11 Issue 2, abril 2008.
- [24] LEON, V.J., WU, S.D., STORER, R.H.. Robustness measures and robust scheduling for job shops. IIE Transactions 26, 32–43. 1994
- [25] LIU, W.; CHUA, T. J.; LAM, J.; WANG, F. Y.; CAI, T. X.; YIN, X. F. **APS, ERP and MES Systems Integration for Semiconductor Backend Assembly**, 7th International Conference on Control, Automation, Robotic and Vision (ICARCV 2002), Singapore, pp. 1403-1408, 3-5 dezembro, 2002.
- [26] LUDWIG, G. D. Controle de tempo no setor de preparação de uma indústria de enxovais: Um estudo. Trabalho de Conclusão de Curso – tecnologia do Vestuário, Faculdade Educacional de dois Vizinhos, Dois Vizinhos, 2005.
- [27] MARDEGAN, R. et al. Os benefícios da coleta automática de dados do chão-de-fábrica para o processo de negócio gestão de demanda. In: Proceedings of XXII Encontro nacional de engenharia de produção. [S.l.: s.n.], 2002. v. 01, p. 01–08.
- [28] MEHTA, S.V.; UZSOY, R. Predictable Scheduling of a Job Shop Subject to Breakdowns. IEEE Transactions on Robotics and Automation 14, 365-378. 1998.
- [29] MERLI, G. Eurochange. The TQM approach to capturing global markets. UK: IFS. 1993.

- [30] MESA, Manufacturing Execution System Association International. The Benefits of MES: A Report from the Field. 1997. 01–12 p. Disponível em: <<http://www.mesa.org>>. Acesso em: 05 de junho de 2010.
- [31] MOREIRA, D. A. (1993). Administração da Produção e Operações. São Paulo: Pioneira.
- [32] NEELY, A.; GREGORY, M.; PLATTS, K. (1995). Performance measurement system design: a literature review and research agenda. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 15, n. 4.
- [33] OUELHADJ, D., PETROVIC, S. **Survey of Dynamic Scheduling in Manufacturing Systems**, *Journal of Scheduling*, 12/4, 2009, 417-431
- [34] PINEDO, M. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. Ed. Springer, ISBN 0387789340, 671 p., 2008.
- [35] RENTES, A. F.; VAN AKEEN, E. M.; ESPOSTO, K. F. (2001). Processo de desenvolvimento de um sistema de medição de desempenho baseado em uma metodologia de transformação organizacional. ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - ENEGEP 2001, 21º, Salvador.
- [36] SAVOLAINEN, T. Cycles of continuous improvement: realizing competitive advantages through quality. *International Journal of Operations & Production Management*. Vol. 19. Nº 11,1999.
- [37] SHIBA, Shoji, et Alli (1997). TQM: Quatro revoluções na gestão da qualidade. Ed. Bookman, Editora Artes Médicas Sul Ltda, Porto Alegre.
- [38] T’KINDT, V. BILLAUT, J.C. *Multicriteria Scheduling Theory, Models and Algorithms*. Ed Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN-10 3-540-28230-0, 2006.
- [39] TURATTI, Rangel. Sistemas avançados de programação da produção: um estudo em empresa prestadora de serviços de manufatura. Porto Alegre: Trabalho de Diplomação em Engenharia de Produção na Universidade Federal do Rio Grande do sul, 2007.
- [40] ZATTAR, I. C. *Análise da aplicação dos sistemas baseados no conceito de capacidade finita nos diversos níveis da administração da manufatura através de estudos de caso*. Dissertação (Mestrado)— Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.