

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA REBALANCEAMENTO
DE UMA LINHA DE USINAGEM

Eng. Felipe Alves de Oliveira Perroni

Santa Bárbara d'Oeste
Março 2017

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Área de Concentração: Engenharia do Produto e do Processo

Linha de Pesquisa: Engenharia do Processo

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA REBALANCEAMENTO
DE UMA LINHA DE USINAGEM**

Eng. Felipe Alves de Oliveira Perroni

ORIENTADOR: PROF. DR.-ING. KLAUS SCHÜTZER

Dissertação apresentada à Banca de defesa no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção

Santa Bárbara d'Oeste
Março 2017

DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO PARA REBALANCEAMENTO DE UMA LINHA DE USINAGEM

Eng. Felipe Alves de Oliveira Perroni

Dissertação de mestrado defendida e aprovada, em 09 de março de 2017, pela
Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Schützer, Presidente
PPGEP – UNIMEP

Prof^a. Dr^a. Maria Rita Pontes Assumpção
PPGEP – UNIMEP

Prof. Dr. Oswaldo Luiz Agostinho
FEM – UNICAMP

Agradecimentos

Ao Professor Dr.-Ing. Klaus Schützer, pela orientação e incentivo para a conclusão deste trabalho.

À minha família, por todo o suporte e incentivo, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado, em especial, minha mãe Lilian Alves de Oliveira Perroni, meu pai Aldo Donizeti Perroni e meu irmão Rafael Alves de Oliveira Perroni, e também aos meus avôs Denison, Iva, Dinorá e Helio que me apoiaram e as minhas tias Marta, Elisa e Emilia e tios Aécio e Marcos.

Aos amigos de trabalho do Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura (SCPM) pelo apoio, incentivo e orientação, em especial, Quinhones Santana e Marcela Santana Romão.

A todos os companheiros da empresa parceira que me auxiliaram quando era necessária a aquisição de dados e verificação das máquinas, que foram fundamentais para a realização do trabalho.

Aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado nos bons e maus momentos, alguns que estão desde o ensino médio, graduação e agora contribuindo na conclusão da dissertação de mestrado, me aconselhando, incentivando, dando apoio e até orientando quando necessário, gostaria de mencionar especialmente, Júlia de Andrade Bertazzi, Matheus Michelluci Bovoline, Alex Camilo, Diogo Henrique Valarini Belozo, Carlos Eduardo Miralles, Marcelo Tamborlin, Matheus Franco Soares, Jonas Weidmann, Letícia Francischini e todos os outros que direta ou indiretamente fizeram parte da conclusão desse trabalho.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa de estudos.

Sumário

Índice de Figuras.....	V
Índice de Tabelas.....	VII
Índice de Anexos.....	VIII
Resumo.....	IX
Abstract.....	X
1 Introdução.....	1
2 Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Fábrica Digital.....	5
2.2 Usinagem Multi-Eixos.....	8
2.2.1 RealNC.....	14
2.2.2 NX® CAM.....	17
2.3 Parâmetros de Máquinas-Ferramenta.....	19
2.3.1 Velocidade e Aceleração para um Perfil Trapezoidal.....	19
2.3.2 <i>Jerk</i>	21
2.3.3 Fator Kv.....	22
2.4 Planejamento do Processo.....	23
2.5 Balanceamento de linha de produção.....	26
2.5.1 Tipos de desperdícios.....	27
2.5.2 Indicadores utilizados no balanceamento da linha.....	28
2.5.3 Gargalos.....	30
2.5.4 Técnicas para detecção de gargalos.....	32
2.5.5 Técnicas de Balanceamento.....	35
2.5.6 <i>Softwares</i> para auxiliar o balanceamento de linha.....	42
3 Objetivos e Método de Trabalho.....	45
3.1 Objetivo Geral.....	45

3.2	Objetivos Específicos.....	45
3.3	Desenvolvimento do trabalho.....	45
3.4	Ferramentas para o desenvolvimento do trabalho.....	48
4	Método de balanceamento de linha de usinagem.....	50
4.1	Etapa 1 – Construção, simulação e documentação.....	52
4.2	Etapa 2 – Restrições e relações entre as ferramentas.....	54
4.3	Etapa 3 – Simulação da linha de produção e construção do diagrama de precedências das ferramentas.....	55
4.4	Etapa 4 – Análise dos gargalos, balanceamento da linha e validação auxiliada pela simulação.....	57
5	Aplicação e Verificação do Método.....	61
5.1	Especificações do processo.....	62
5.2	Aplicação do Método.....	64
5.3	Discussão dos resultados.....	79
6	Conclusão e Trabalhos Futuros.....	80
7	Bibliografia.....	81

Índice de Figuras

Figura 2.1: A integração entre a fábrica virtual e a real considerando o conceito de Fábrica Digital, adaptado de Kuehn [8].....	6
Figura 2.2: Fabrica Digital: Benefícios e Esforços, adaptado de Kuehn [8,14].	7
Figura 2.3: Etapas para a programação NC em máquinas multi-eixos [24].....	11
Figura 2.4: Exemplo de aplicação da verificação de trajetória com a máquina-ferramenta virtual (RealNC)	11
Figura 2.5: Fluxograma para construção da simulação cinemática e dinâmica [24]...	14
Figura 2.6: Ambiente de Trabalho do Software RealNC®.....	16
Figura 2.7: Ambiente de trabalho do NX CAM para simulação de usinagem	18
Figura 2.8: Perfil de velocidade trapezoidal, adaptado de Altintas [33].....	20
Figura 2.9: Perfis cinemáticos para geração de velocidade de avanço com perfil de Jerk Limitado, adaptado de Altintas [33].....	21
Figura 2.10: Reação do sistema de controle da máquina durante o teste para verificação da trajetória real em comparação a nominal [32].....	23
Figura 2.11: Tarefas para o Planejamento do Processo, adaptado de Halevi [37].....	24
Figura 2.12: Esquema de uma linha com determinação dos tempos de ciclo, adaptado de Dilworth [49].....	29
Figura 2.13: Relação Takt-time x Tempo de Ciclo.....	30
Figura 2.14: Métodos de detecção de gargalos, adaptado de Betterton e Silver [55]..	32
Figura 2.15: Exemplo de pontos de giro em uma linha, adaptado de Li, et al. [59]	34
Figura 2.16: Diagramas de precedência, adaptado de Dou et al. [60]	37
Figura 2.17: Diagrama de precedência com as tarefas e precedências, para aplicação do método RPW, adaptado de Ghutukade & Sawant [64]	38
Figura 2.18: Exemplo de atribuição das estações de trabalho para as tarefas, adaptado de Reginato et.al [63]	41
Figura 2.19: Área de trabalho do software Plant Simulation 11®.....	43
Figura 3.1: Etapas do trabalho	46
Figura 4.1: Fluxograma do método de rebalanceamento de linhas de usinagem	51
Figura 4.2: 1ª Parte do fluxograma do método de rebalanceamento de linhas de usinagem.....	52
Figura 4.3: 2ª Parte do fluxograma do método de rebalanceamento de linhas de usinagem.....	54

Figura 4.4: 3ª Parte do fluxograma do método de rebalanceamento de linhas de usinagem.....	55
Figura 4.5: 3ª Parte do fluxograma do método de rebalanceamento de linhas de usinagem.....	58
Figura 5.1: Faces do bloco do motor, esquerda “Polia” e direita “Câmbio”.....	62
Figura 5.2: Faces do bloco do motor, esquerda “Blow-by” e direita “Selo”	63
Figura 5.3: Faces do bloco do motor, esquerda “Cabeçote” e direita “Carter”	63
Figura 5.4: Modelos das máquinas das operações prontos para simulação.	64
Figura 5.5: Tabela Op10 com informações da usinagem (Exemplo)	65
Figura 5.6: Parte de um dos diagramas de precedência, para digramas completos ver Anexos 12 a 15	68
Figura 5.7: Gráfico Takt-Time x Tempo de Ciclo.....	70
Figura 5.8: Gráfico com as estatísticas de recursos do estado atual em porcentagem, gerado pela simulação no Plant Simulation.	70
Figura 5.9: Gráfico com os tempos de ciclo dos diferentes cenários de balanceamento das operações e tabela com os respectivos valores	74
Figura 5.10: Gráfico com as estatísticas do balanceamento com a ferramenta B3015 em porcentagem, gerado pela simulação no Plant Simulation	75
Figura 5.11: Gráfico com as estatísticas do balanceamento, com a ferramenta B3030, em porcentagem, gerado pela simulação no Plant Simulation	76
Figura 5.12: Gráfico com as estatísticas do balanceamento em porcentagem, com as ferramentas B3015 e B3030, gerado pela simulação no Plant Simulation	77

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Tabela com as tarefas e seus respectivos tempos e precedências, para aplicação do método RPW, adaptado de Ghutukade & Sawant [62].....	39
Tabela 2.2: Tabelas com os passos para a realização do método RPW, adaptado de Ghutukade & Sawant [64].....	40
Tabela 2.3: a) tarefas reordenadas de acordo com os valores de tempo; b) tarefas distribuídas às estações de trabalho.....	41
Tabela 5.1: Dados referentes às máquinas e produtos da linha	61
Tabela 5.2: Ferramentas utilizadas em mais de um produto	66
Tabela 5.3: Verificações de máquinas e as faces disponíveis para usinagem.	67
Tabela 5.4: Tempo resultante da simulação no RealNC para inserção nas máquinas do Plant Simulation e tempos de ciclo calculados para verificação prévia	69
Tabela 5.5: Tabela com as porcentagens atuais de trabalho das operações, pela simulação da linha no Plant Simulation.....	71
Tabela 5.6: Ferramenta verificada como a única específica do 1.0l MPI 3Cyl.....	72
Tabela 5.7: Tabela de potenciais ferramentas para realocação da OP30.....	73
Tabela 5.8: Tabela com as porcentagens de trabalho das operações no balanceamento com a ferramenta B3015.....	75
Tabela 5.9: Tabela com as porcentagens de trabalho das operações no balanceamento com a ferramenta B3030.....	77
Tabela 5.10: Tabela com as porcentagens de trabalho das operações no balanceamento com as ferramentas B3015 e B3030.	78

Índice de Anexos

Anexo 1 – Documentação Operação 10, Parte 1	89
Anexo 2 – Documentação Operação 10, Parte 2	90
Anexo 3 – Documentação Operação 20, Parte 1	91
Anexo 4 – Documentação Operação 20, Parte 2	92
Anexo 5 – Documentação Operação 20, Parte 3	93
Anexo 6 – Documentação Operação 30, Parte 1	94
Anexo 7 – Documentação Operação 30, Parte 2	95
Anexo 8 – Documentação Operação 30, Parte 3	96
Anexo 9 – Documentação Operação 30, Parte 4	97
Anexo 10 – Documentação Operação 30, Parte 5	98
Anexo 11 – Documentação Operação 30, Parte 6	99
Anexo 12 – Diagrama de Precedências OP10	100
Anexo 13 – Diagrama de Precedências OP20	100
Anexo 14 – Diagrama de Precedências OP30	101
Anexo 15 – Diagrama de Precedências OP80	101
Anexo 16 – Legenda de cores dos Diagramas de Precedência	102

Resumo

O aumento das pressões competitivas nas empresas, inseridas em um ambiente globalizado, a redução do ciclo de vida dos produtos e a necessidade de produtos personalizados exigem das indústrias uma nova posição de mercado mais flexível e com menor tempo de resposta dos sistemas de produção, assim como a melhoria contínua da produtividade. O conceito de Fábrica Digital com seus métodos e ferramentas de simulação podem simular toda uma fábrica desde o planejamento das instalações até os processos de produção mais complexos de uma máquina. A aplicação deste conceito, visa desde a visualização de todo o fluxo de materiais e operações logísticas e sua otimização, até a simulação das condições de corte. Essa dissertação tem por objetivo o desenvolvimento de um método para o rebalanceamento de linhas de manufatura com multiprodutos com auxílio das ferramentas e métodos de Fábrica Digital. Este método, servirá para um rebalanceamento mais exato da linha de usinagem já existente na empresa. O método, utiliza modelos digitais que representem as máquinas-ferramenta reais, chamados de modelos “*As Built*”. Os modelos são apropriados para a simulação dos processos produtivos. A utilização desse método permitirá avaliar modificações e melhorias no processo de forma ágil, identificar gargalos e realizar o rebalanceamento de uma linha de usinagem já existente com maior exatidão.

Palavras-chave: Fábrica Digital; Simulação; Balanceamento de linha.

Abstract

Increased competitive pressure in companies, embedded in a globalized environment, the reduction of product life cycle and the need for customized products require from the companies a new market plan, more flexible and in a lower feedback time of the production systems, such as the continuously improvement of productivity. The concept of Digital Factory such as the simulation methods and tools can help the whole factory from the facility planning to the production process of a machine. The application of this concept, aim from the complete material flow and logistics operation and the optimization up to the simulation of machining conditions. This master is thesis focused on the development of a method in order to rebalance a manufacture line with multi-products, supported by the tool and methods of Digital Factory. This method will fit for a more accurate rebalance from the machining line, already operating in the factory. The method use the digital models that represents the real machine tools, called "As Built" models. The models are suitable for the simulation of productive process. The use of this method allows a quick evaluation of process modifications and improvements, identification of bottlenecks and realize a more accurate rebalancing from an operating machining line.

Keywords: Digital Factory; Simulation; Line balancing.

1 Introdução

O mercado globalizado exige de vários setores industriais a personalização e produção de novos produtos, sempre em ciclos de desenvolvimento cada vez menores. A fim de lidar comercialmente com o produto e a produção cada vez mais complexos, novos procedimentos e instrumentos se mostram necessários, os quais podem ser proporcionados pela Fábrica Digital [1].

O conceito de Fábrica Digital oferece a possibilidade de uma antecipada paralelização e de uma completa virtualização do processo de desenvolvimento do produto e do planejamento da produção. Essa prática possibilita a realização de um virtual *Start up* e o funcionamento operacional virtual da fábrica, por meio do gerenciamento integrado de dados, do produto e do processo, alcançando um maior nível de maturidade para o início da produção [1,2].

Segundo Bracht e Masurat, uma das maiores dificuldades para uso do conceito de Fábrica Digital é na fase de implementação. Isto porque, assim como a introdução de um novo sistema, seu uso afeta as estruturas e os procedimentos da empresa. É esperado que a implementação de projetos desenvolvidos com este conceito possa provocar mudanças nos processos produtivos existentes, assim como para os sistemas de monitoramento e controle auxiliado por computador de todo o operacional da fábrica [3].

Considerando o conceitos e ferramentas de Fábrica Digital, o qual consiste na simulação da fábrica, utilizando de modelos virtuais de todo o ambiente real. Este trabalho utiliza a simulação da manufatura para processos de usinagem com máquinas multi-eixos, tais como centros de usinagem com 4 ou 5 eixos que permitem a usinagem de peças complexas.

A usinagem de peças com máquinas multi-eixos é complexa, pois é necessário que o programador tenha o conhecimento sobre toda a estrutura da máquina-ferramenta, limites de cursos, eixos e interações entre a ferramenta, a peça e os dispositivos de fixação [4].

A simulação auxilia como instrumento de análise de potenciais colisões, nas trajetórias de ferramentas e estimativas dos tempos de usinagem. Para o processo de criação desse ambiente virtual existem diversos *softwares* que auxiliam na visualização, correção e otimização do processo de usinagem com máquinas-ferramenta. O RealNC® e o NX® com módulo MTB® (*Machine Tool Builder*), *softwares* da Siemens, auxiliam no planejamento e otimização do processo. Ambos programas já oferecem diversos modelos de controladores mais próximos do real, para interpretar programas NC para máquinas-ferramenta. Eles possibilitam a simulação dos modelos de máquinas considerados “*As Built*”, ou seja, iguais ao real, para verificações do programa NC, para planejamento da trajetória de ferramenta e, com maior exatidão, para simular os tempos de usinagem. Estes permitem criar controladores complexos para simular sistemas de máquinas-ferramenta específicas e customizadas, utilizadas para produção de larga escala [5,6].

Considerando a necessidade de explorar alternativas para a reduzir o tempo de fabricação dos produtos, mas sem impactar na alteração da qualidade do produto, buscando a redução do custo de fabricação. O conceito de Fábrica Digital, vem com a proposta de auxiliar nessa tarefa com simulação das máquinas-ferramentas. Na qual, podem ser construídos diferentes cenários, que são verificados virtualmente, visando alcançar melhores resultados e para com uma maior exatidão realizar, como por exemplo, reduções do tempo de usinagem, sem necessidade de paradas de máquina para testes.

Fábrica Digital, é um conceito amplamente aplicado por várias empresas do setor automobilístico (Mercedes, Volkswagen, Audi), tem o objetivo reproduzir os processos, produtos e recursos reais em modelos virtuais. Estas empresas fazem o uso deste conceito para redução do tempo de produção realizando a simulação das máquinas-ferramenta em linhas de usinagem.

As linhas de usinagem constantemente recebem modificações, sejam essas, por melhoria do processo, novas ferramentas e ajustes de parâmetros de usinagem. Essas modificações são algumas das alternativas para a redução dos tempos de fabricação dos produtos. Porém, quando se aplica alguma destas melhorias, somente o tempo de produção da operação específica que sofreu modificações

é reduzido, aparecendo novos gargalos em uma linha que era balanceada. Para que estas melhorias sejam realmente efetivas, faz-se necessário uma realocação das ferramentas, entre as máquinas, para que seja possível criar um novo balanceamento da linha. A linha pode ser composta de diferentes produtos, ou mesmo, variações de um mesmo produto, que utilizem as mesmas máquinas e ferramentas do produto alvo. Com isso, faz-se necessária a verificação completa da linha, para que o novo rebalanceamento não gere o desbalanceamento da linha para outros produtos.

Levando em consideração as questões levantadas sobre as verificações necessárias para se realizar um correto rebalanceamento da linha, faz-se necessário a construção de um método para auxílio no rebalanceamento de linhas de usinagem com multi-produtos. Para o desenvolvimento do método, a simulação de máquinas-ferramenta mostra-se uma ferramenta importante para auxiliar no rebalanceamento da linha, alcançando tempos de usinagem mais exatos, com isso alcançando melhores resultados para a implementação real do rebalanceamento. Essa maior exatidão nos tempos de usinagem é solicitada pelo fato das máquinas-ferramenta apresentarem variações do tempo de usinagem, que ocorre pela diferença nos parâmetros dinâmicos de máquina, mesmo sendo o mesmo modelo de máquina.

Atendendo aos desafios do cenário apresentado o objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de um método para rebalanceamento de linhas de usinagem para multiprodutos com auxílio da simulação do programa NC da máquina-ferramenta, em execução na produção, o qual será apresentado mais detalhado no Capítulo 3 juntamente com o método proposto para o desenvolvimento do trabalho.

Este trabalho possui sete capítulos que estão detalhados a seguir:

Capítulo 1 – Introdução – Apresenta uma contextualização sobre o tema da pesquisa e indica as necessidades que são desenvolvidas nesta pesquisa.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica – Revisão da literatura sobre Fábrica Digital, usinagem multi-eixos, parâmetros de máquina-ferramenta, planejamento do processo e balanceamento de linha de produção.

Capítulo 3 – Objetivos e Método de Trabalho – Apresentação dos objetivos e do método e ferramentas para desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 4 – Método de balanceamento de linha de usinagem – Apresentação do método desenvolvido para otimização do balanceamento de linhas de usinagem apoiado pelo conceito de Fábrica Digital

Capítulo 5 – Aplicação – Aplicação do método proposto com o intuito de validá-lo e realizar um estudo em uma empresa fabricante de bloco de motores.

Capítulo 6 – Conclusão – Apresenta a conclusão do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 7 – Bibliografia – Lista das referências utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada uma revisão dos conceitos importantes para a realização deste trabalho, além de uma revisão sobre trabalhos já realizados relacionados a simulação de processos de usinagem e balanceamento de linhas de usinagem.

2.1 Fábrica Digital

Fábrica Digital é definida como o modelamento de uma fábrica com uso de um conjunto de *softwares* dentro de uma rede digital de modelos, métodos e ferramentas, incluindo a simulação e visualização 3D, para planejamento de processos de fabricação e montagem [3], planejamento e otimização da produção [7], implementação, controle e melhoria contínua dos processos e recursos fabris para a fabricação do produto [1].

Segundo a Norma VDI-4499: “Fábrica Digital é o termo genérico para uma ampla rede de modelos digitais, métodos e ferramentas, entre outros a simulação e visualização 3D, que são integrados através de um contínuo gerenciamento de dados. Seu objetivo é o planejamento integrado, avaliação e contínua melhoria de todas as estruturas, processos e recursos da fábrica real em conexão com o produto” [1].

Com as tecnologias empregadas na Fábrica Digital é possível modelar, em uma fábrica virtual, os produtos, processos e instalações fabris. Baseado nos produtos e processos virtuais, pode-se realizar simulações para a otimização do planejamento da produção virtual, que é confiável o suficiente para a implementação, mais livre de erros, na fábrica real. Fábrica Digital é um termo abrangente que inclui a fábrica virtual e sua integração com a fábrica real, como mostra a Figura 2.1 [8].

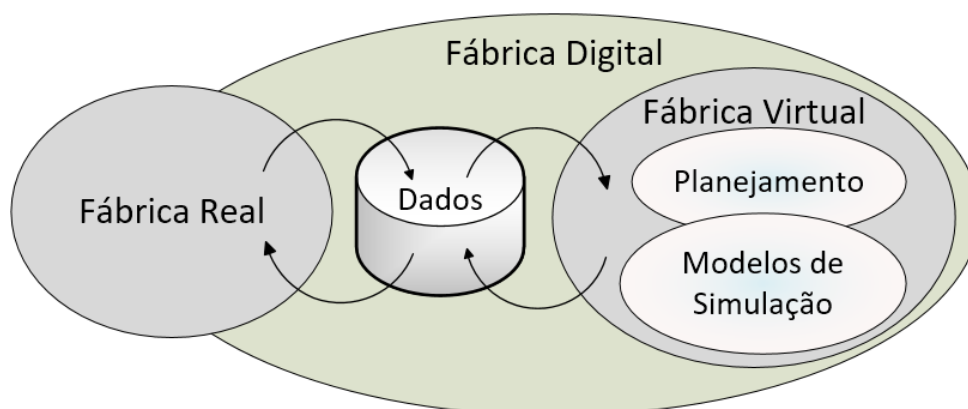


Figura 2.1: A integração entre a fábrica virtual e a real considerando o conceito de Fábrica Digital, adaptado de Kuehn [8].

O conceito de Fábrica Digital oferece a possibilidade de uma antecipada paralelização e virtualização do processo de desenvolvimento do produto e do planejamento da produção, auxiliado pela simulação de cenários alternativos dos processos produtivos. A simulação auxilia por agilizar o projeto e planejamento dos processos, antes da implementação na fábrica real, apresentando diversos benefícios. Além da agilidade nas decisões, que ocasiona a redução do *Time-to-Market*, há a minimização de erros operacionais potenciais, com uma consequente melhoria de produtividade na fábrica real. A Figura 2.2 exemplifica esse conceito [1,2,8].

Os principais objetivos da Fábrica Digital no ciclo de desenvolvimento do produto podem ser divididos em três categorias: redução de tempo de produção, aumento de qualidade e redução de custos. Para alcançar esses objetivos, é necessário um apropriado grau de maturidade do processo ainda na fase de planejamento da produção [9], ou seja, adquirir maior exatidão dos dados nas atividades de planejamento antes mesmo da implantação dos meios de produção. A construção do ambiente de Fábrica Digital é muito mais do que a soma de ferramentas de planejamento individuais e metas [8]. Ela auxilia na realização da:

- Integração do planejamento da produção e desenvolvimento do produto [8,10];

- Tomada rápida de decisões sobre investimento baseando-se em dados seguros do planejamento, no que diz respeito à eficiência, flexibilidade e redução dos tempos (*Time-to-Market*); [8,9]
- Melhoria na transparência e visualização dos processos, podendo adiantar uma reavaliação dos detalhes e readequar o produto as novas condições de fabricação; [9,11,12]
- Redução do custo de implementação de um novo produto ou dispositivo na linha, pela utilização da simulação virtual, reduzindo experimentos reais na prevenção de erros; [8,9,13]
- Início de uma produção rápida e segura (*Time-to-volume*); [8]
- Garantir à produção e à cadeia de suprimentos uma completa otimização (*Time-to-Customer*). [8]

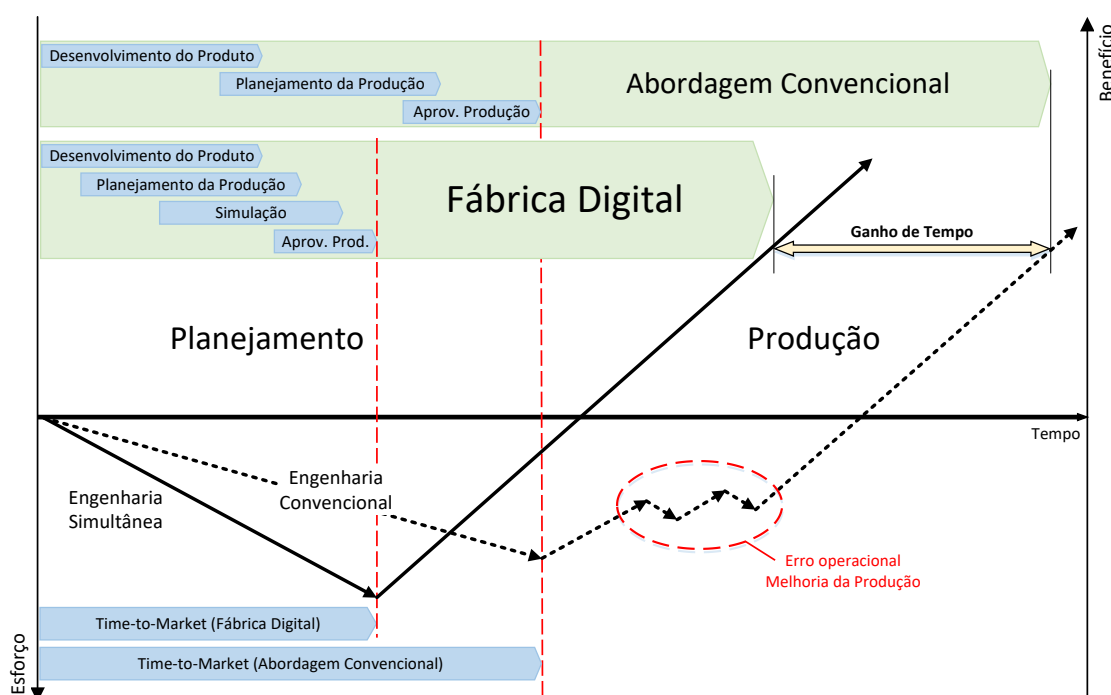


Figura 2.2: Fábrica Digital: Benefícios e Esforços, adaptado de Kuehn [8,14].

O conceito de Fábrica Digital apresenta ferramentas que auxiliam o planejamento de ações para o projeto do sistema produtivo, permitindo eficiência na implementação e fabricação de um novo produto. Isto é feito de forma antecipada e com informações seguras [15].

Mesmo após a implementação de uma linha de produção e a conclusão do projeto do processo, a Fábrica Digital auxilia na fase seguinte, a otimização do plano de processo inicial. Esta otimização é auxiliada pelas informações já simuladas e na observação e documentação das informações da linha de produção real em funcionamento [12].

A implementação da Fábrica Digital resulta em uma grande economia de tempo e custos, mas exige esforços para sua implementação. No desenvolvimento atual para implementação de Fábrica Digital, ainda requer a procura de soluções para diversos problemas, principalmente na fase de implementação [3,16]. .

Assim como a introdução de um novo sistema, o uso da Fábrica Digital afeta as estruturas e os procedimentos da empresa. Por esse motivo, é esperado que a implementação de projetos desenvolvidos com este conceito, possam provocar mudanças nos processos produtivos existentes, assim como para os sistemas de monitoramento auxiliado por computador e o controle operacional da fábrica [3].

No Brasil, uma das empresas que vem adquirindo resultados significativos com a implantação da Fábrica Digital é a Volkswagen. Sua primeira utilização ocorreu entre 1999 e 2002, com o planejamento, projeto e instalação das linhas do Polo, na planta Anchieta em São Bernardo do Campo [12]. No mercado automotivo, onde a pressão por lançamentos é constante, os carros devem ser lançados mais rapidamente, com qualidade e preço que garantam rentabilidade à montadora e a associados [17].

2.2 Usinagem Multi-Eixos

A usinagem com centros de usinagem multi-eixos, por apresentar além dos três eixos de translação convencionais (X/Y/Z) os eixos rotativos, podendo ser em torno de qualquer um dos eixos (A/B/C, respectivamente). Os eixos rotativos proporcionam um enorme ganho de flexibilidade para a usinagem, dando a máquina uma liberdade de orientação da ferramenta com relação à peça [18].

A realização da usinagem de peças complexas com centros de usinagem multi-eixos é uma atividade complexa. Todo o processo deve ser levado em consideração, desde a construção do produto em sistemas CAD, que pode influenciar na geração da trajetória da ferramenta, até a programação da usinagem com sistemas CAM, que dependem muito da experiência e conhecimento do programador da máquina a ser utilizada, de acordo com a arquitetura, dispositivos e movimentação [19].

A utilização de sistemas CAM proporciona uma melhora no processo de fabricação de peças com formas geométricas complexas, pela facilidade na criação do programa NC e uma verificação prévia da trajetória da ferramenta. Para o cálculo de programas NC em um *software* CAM, inicialmente é necessário um modelo CAD. [20]. Entretanto um contratempo bastante comum está na utilização de distintos sistemas CAD/CAM, os quais não conseguem se conversar pelos seus formatos nativos. Para estes casos, é necessário o uso de arquivos de formatos neutros. Para a utilização de formatos neutros é necessário um grande conhecimento dos formatos a serem utilizados na importação e exportação do modelo, para que seja minimizada a perda de informações e o retrabalho [18].

O processo tradicional utilizando sistemas CAM ocorre da seguinte forma:

- A construção do modelo em um sistema CAD, no qual a qualidade do modelo geométrico possui influência sobre o processo de usinagem. Peças com descontinuação e com variações na suavidade da superfície, podem ocasionar problemas na geração da trajetória da ferramenta e conseqüentemente possíveis marcas e até colisões com a peça [4,18];
- O modelo CAD é importado para o sistema CAM, para início das atividades de programação [21];
- No sistema CAM são determinadas, para cada método de usinagem (desbaste, pré-acabamentos e acabamento), as regiões a serem usinadas. Em cada uma destas regiões serão geradas as trajetórias da ferramenta, definidas as faixas de tolerância CAM para a interpolação da trajetória da ferramenta, as estratégias de corte, o tipo de interpolação de trajetória, informações de ferramentas e *holders*. Com estas informações inseridas no

sistema, é gerado o arquivo genérico. Este arquivo contém somente coordenadas de posição da trajetória da ferramenta (CLF – *Cutter Location File*), independente da linguagem do comando numérico no qual será manufaturada a peça [19,21];

- É realizada uma visualização gráfica da retirada de material da peça pela ferramenta, verificando possíveis erros na trajetória da ferramenta, a qual não leva em consideração a arquitetura da máquina, dispositivos de fixação e limites de movimentação [4,22,23];
- Pós-processamento – esta é a fase onde ocorre a tradução das coordenadas da trajetória de ferramenta para uma linguagem específica compreensível pelo controlador da máquina-ferramenta CNC, gerando o programa NC específico [19];
- Para verificação do programa NC são realizados, na própria máquina-ferramenta, testes com a usinagem em “vazio” ou resina, podendo ainda ter o risco de colisão (como por exemplo: ferramenta colidir com o dispositivo ou até mesmo com a mesa) [19];
- No caso de detecção de colisões ou erros no programa é realizada a modificação e a repetição dos testes até que o programa NC esteja isento de problemas [19].

O ciclo de programação CAM para multi-eixos tem alto risco de colisão, alto tempo de ajuste do programa e, portanto, maior tempo de máquina parada para testes. O desenvolvimento e aplicação de uma máquina-ferramenta virtual se torna necessário [24]. Com uma nova etapa na programação NC de máquinas multi-eixos, a etapa de simulação da usinagem com a máquina virtual, isto se torna possível (Figura 2.3).

A simulação de usinagem utilizando a máquina-ferramenta virtual permite ao programador visualizar a trajetória da ferramenta, analisando as possíveis falhas dentro da programação, melhoria do processo de usinagem. O programador também analisa as das transições entre os métodos de usinagem e trocas de ferramentas [19,24]. A Figura 2.4 mostra a verificação da trajetória de ferramenta durante a simulação de usinagem em uma máquina multi-eixos, auxiliando na verificação da trajetória da ferramenta para a rotação da mesa.

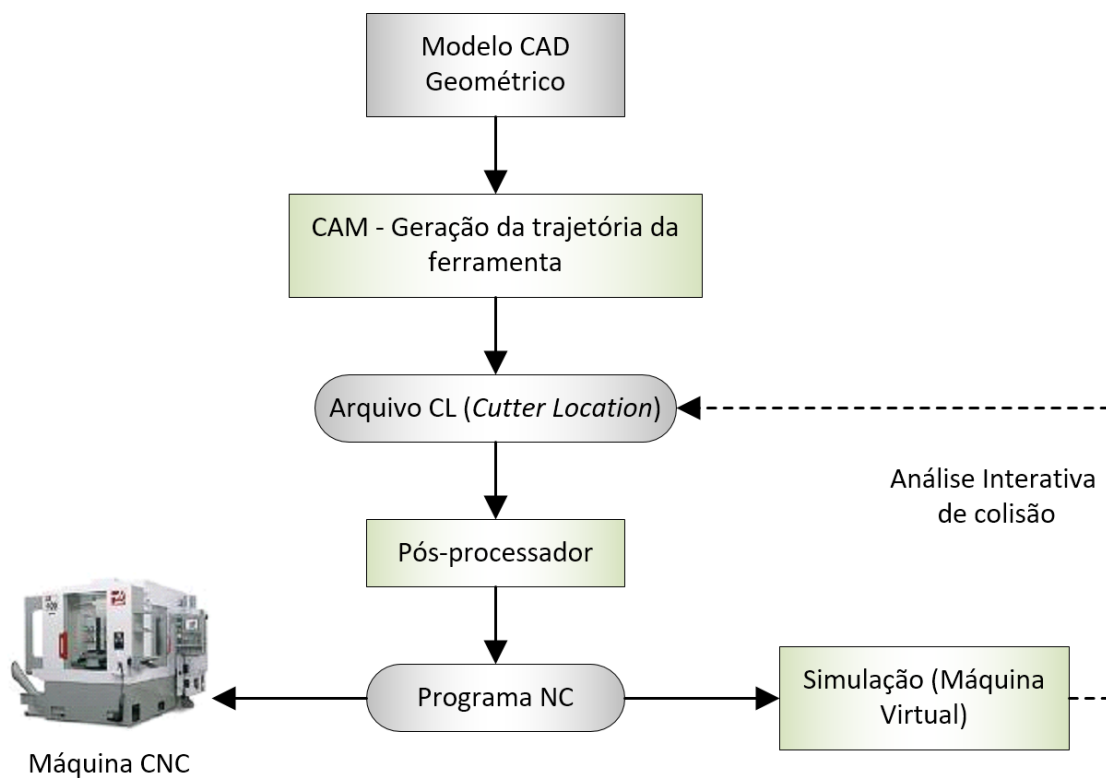


Figura 2.3: Etapas para a programação NC em máquinas multi-eixos [24]

Existem dois tipos principais de simulação de máquinas-ferramenta, a simulação cinemática e a simulação considerando o desempenho dinâmico da máquina ferramenta e o comando numérico.

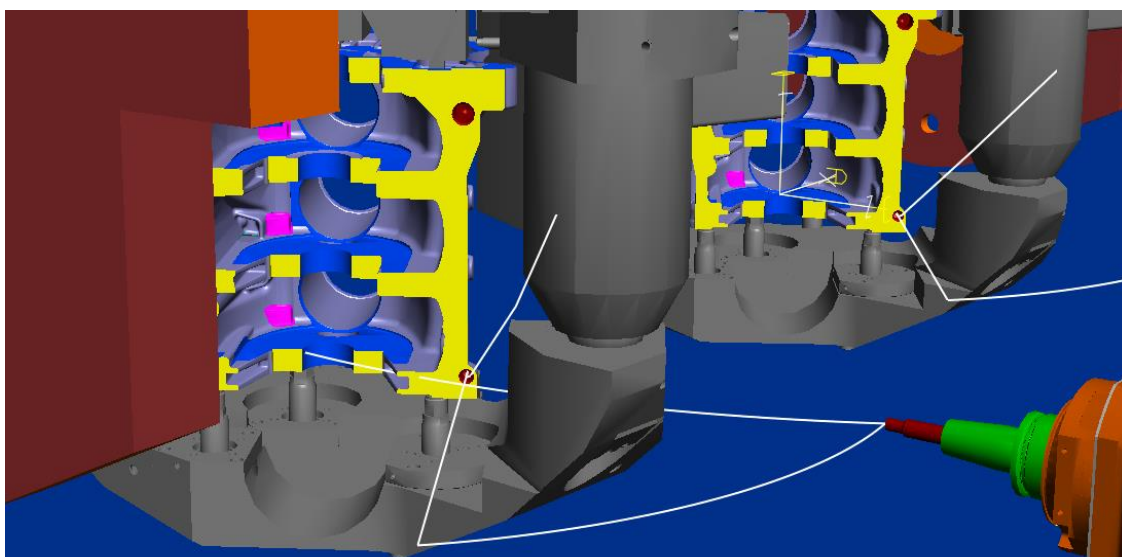


Figura 2.4: Exemplo de aplicação da verificação de trajetória com a máquina-ferramenta virtual (RealNC)

Como diz o próprio nome, a simulação cinemática reproduz os movimentos, limites de curso e velocidades dos eixos do modelo virtual da máquina-ferramenta construído em um sistema CAD. Isto permite uma visualização próxima do real, do posicionamento da peça dentro da área de trabalho em relação aos eixos, dispositivos de fixação e o comportamento em relação à trajetória da ferramenta, sem considerar parâmetros dinâmicos, como por exemplo, as acelerações, desacelerações e outros parâmetros que interferem no tempo de usinagem em uma máquina real [17,22].

A simulação dinâmica de máquinas-ferramenta virtuais já considera os parâmetros dinâmicos. Ela consiste da movimentação dos eixos e velocidades dos eixos, e também das acelerações, *jerk*, entre outros parâmetros que atuam no comportamento dinâmico do processo de usinagem. Com a simulação dinâmica é possível determinar o tempo real de usinagem da máquina, definindo corretamente todos os parâmetros acima citados, para que a máquina virtual seja considerada um modelo “*As Built*”, ou seja, como a máquina real [19,24].

A usinagem do tipo de fresamento de superfícies esculpidas e usinagem de peças complexas, com diversos planos de trabalho, são usadas com uma ampla aplicação em diversas áreas da fabricação. Um exemplo é a produção de componentes para aeronaves, no qual, em alguns casos, alcançam até 95% de remoção do volume do bloco bruto para a construção das peças. Com isto, uma simulação criteriosa antes da usinagem, permite maior grau de confiabilidade, na determinação dos caminhos de ferramentas, para eventuais modificações necessárias ou mesmo otimizações no programa NC da peça a ser produzida, antes de ser inserido na máquina-ferramenta real [25,26].

A maior parte dos sistemas para simulação de máquinas-ferramenta apenas reproduzem os dados genéricos de trajetória da ferramenta. Essa abordagem não leva em consideração os códigos NC. O uso de um Controlador NC Virtual (VNC - *Virtual NC Controller*) aumenta a confiabilidade na usinagem. A simulação baseada nos programas de código NC, capaz de realizar a verificação dos programas NC, serão interpretados pelo controlador da máquina real, antes da sua implementação. O VNC é utilizado para simular o comportamento do controlador real integrado com os modelos geométricos e parâmetros da

máquina, alcançando uma simulação com nível de exatidão próximo ao real, ou em outras palavras um modelo “*As Built*” [26].

O controlador VNC executa a mesma tarefa de um controlador de uma máquina real, pois faz a interpretação dos códigos NC específicos do programa e traduz em comandos para os eixos, que direcionam e movimentam a máquina-ferramenta virtual, para a usinagem da peça na geometria desejada. Com isso, são avaliados a usinagem, posições de origem da máquina e da peça, as movimentações executadas por sub-rotinas específicas das máquinas, como trocas de ferramentas e outras tarefas. O VNC auxilia a verificação completa do processo [26].

O fluxograma da Figura 2.5 mostra as etapas necessárias do método para construção da simulação cinemática e dinâmica com VNC. É essencial a verificação de todas as etapas para um correto funcionamento da máquina virtual [24].

O método para criação de modelo de simulação da máquina virtual é separado em dois blocos de etapas. O primeiro é responsável pela construção e verificação da simulação cinemática. O segundo bloco realiza a construção da simulação dinâmica. A simulação dinâmica usa o modelo cinemático para inserção dos parâmetros dinâmicos e do VNC específico da máquina (com os sub-programas e rotinas específicas retirados da máquina real). Depois de verificar que o modelo de simulação dinâmico consegue compreender todo o programa NC e alcançar os tempos de usinagem da máquina ferramenta real tem-se, então, um modelo de máquina-ferramenta virtual “*As Built*” [24].

São vários os *softwares* comerciais para a simulação dinâmicas de máquinas-ferramenta com controlador VNC. Essa dissertação irá explorar os *softwares* da Siemens, pois são *softwares* que grandes montadoras estão utilizando para a implementação do ambiente de Fábrica Digital, como por exemplo a Volkswagen, empresa parceira do Laboratório SCPM (Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura) da UNIMEP. O Laboratório SCPM conta com os dois *softwares* utilizados pela montadora, o Siemens Tecnomatix RealNC® e o Siemens NX® CAM.

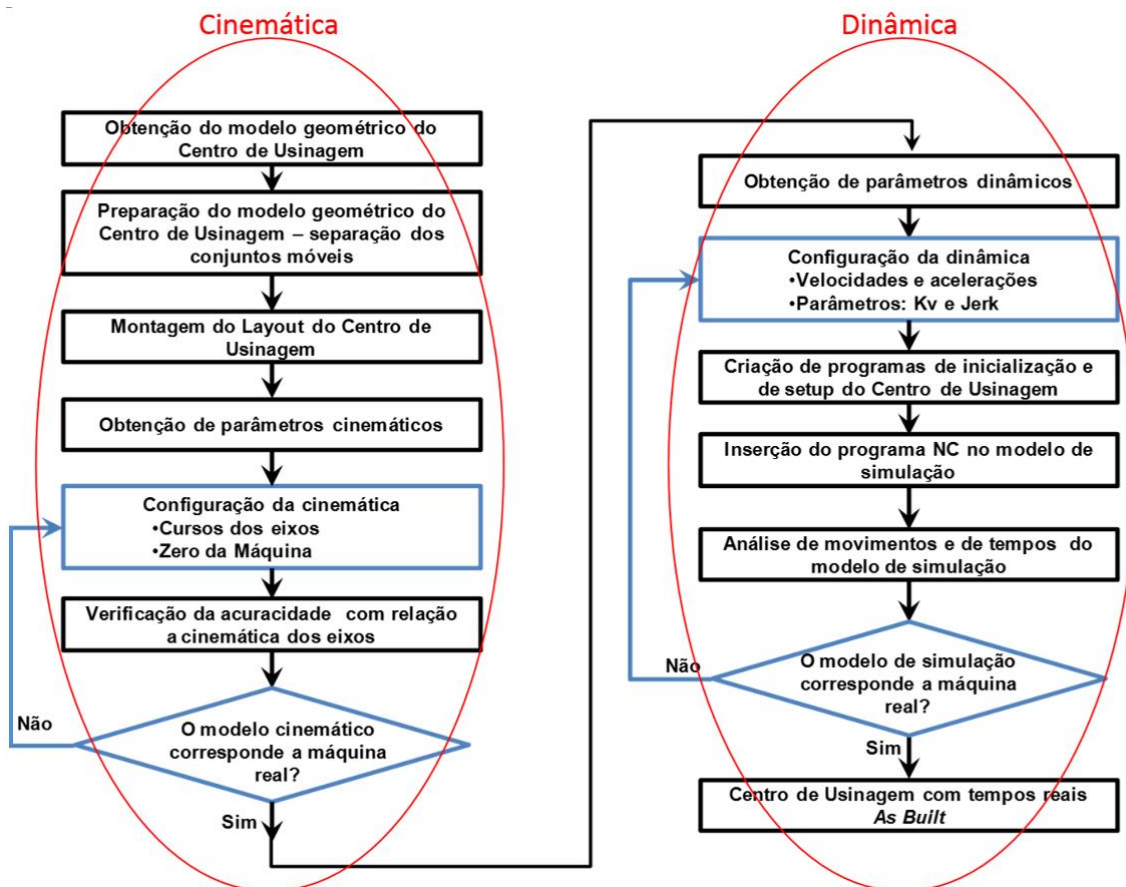


Figura 2.5: Fluxograma para construção da simulação cinemática e dinâmica [24]

2.2.1 RealNC

O software Siemens Tecnomatix RealNC[®] é uma ferramenta *Off-line* para análise detalhada e otimização de programas NC. Este software realiza a simulação NC baseada nos comandos específicos da máquina na linguagem de códigos G¹, executando com exatidão e detalhe o processo, utilizando modelos de máquinas-ferramenta “*As Built*” [27].

¹ Linguagem de programação de máquinas-ferramenta em códigos G é linguagem de programação normalizada de acordo com a norma ISO 6983. Segundo esta norma é comumente referenciada como programação em códigos G (“*G code programming*”) ou programação ISO (“*ISO programming*”). Essa norma destina-se a especificar o formato do programa para ser usado em máquinas-ferramenta com controle numérico (NC) [74].

O *software* auxilia na verificação de tempos de usinagem, para redução de ciclos de usinagem. Também verifica as trajetórias de ferramenta, reduzindo riscos de colisões entre ferramenta e peça. Avalia o comportamento da máquina levando em consideração dispositivos de fixação e outros dispositivos utilizados durante a usinagem. Este *software* aponta quando erros são encontrados no programa NC antes de implementados na linha de manufatura [27].

A Figura 2.6 mostra o ambiente de trabalho do RealNC® com o modelo da máquina-ferramenta pronto para a simulação e algumas das funções do programa, que estão demarcadas em diferentes cores:

- A área demarcada em vermelho mostra todos os modelos geométricos e frames do modelo (os quais podem ser ocultadas para facilitar na visualização da simulação);
- A área em amarelo é onde é feita a leitura e edição do programa NC, podem ser definidos pontos de parada no programa, ou até mesmo realizar a leitura linha a linha, para uma verificação mais criteriosa da movimentação;
- A área em verde mostra o painel de notificações, apresenta os tempos de usinagem, rotinas utilizadas e problemas que possam ocorrer durante a interpretação do programa NC durante a simulação;
- A área delimitada em azul claro é uma caixa com diversas funções para auxílio da verificação da trajetória da ferramenta, como o tipo de remoção de material (Continua, em bloco ou sem remoção) e mostrar linha de trajetória de ferramenta.

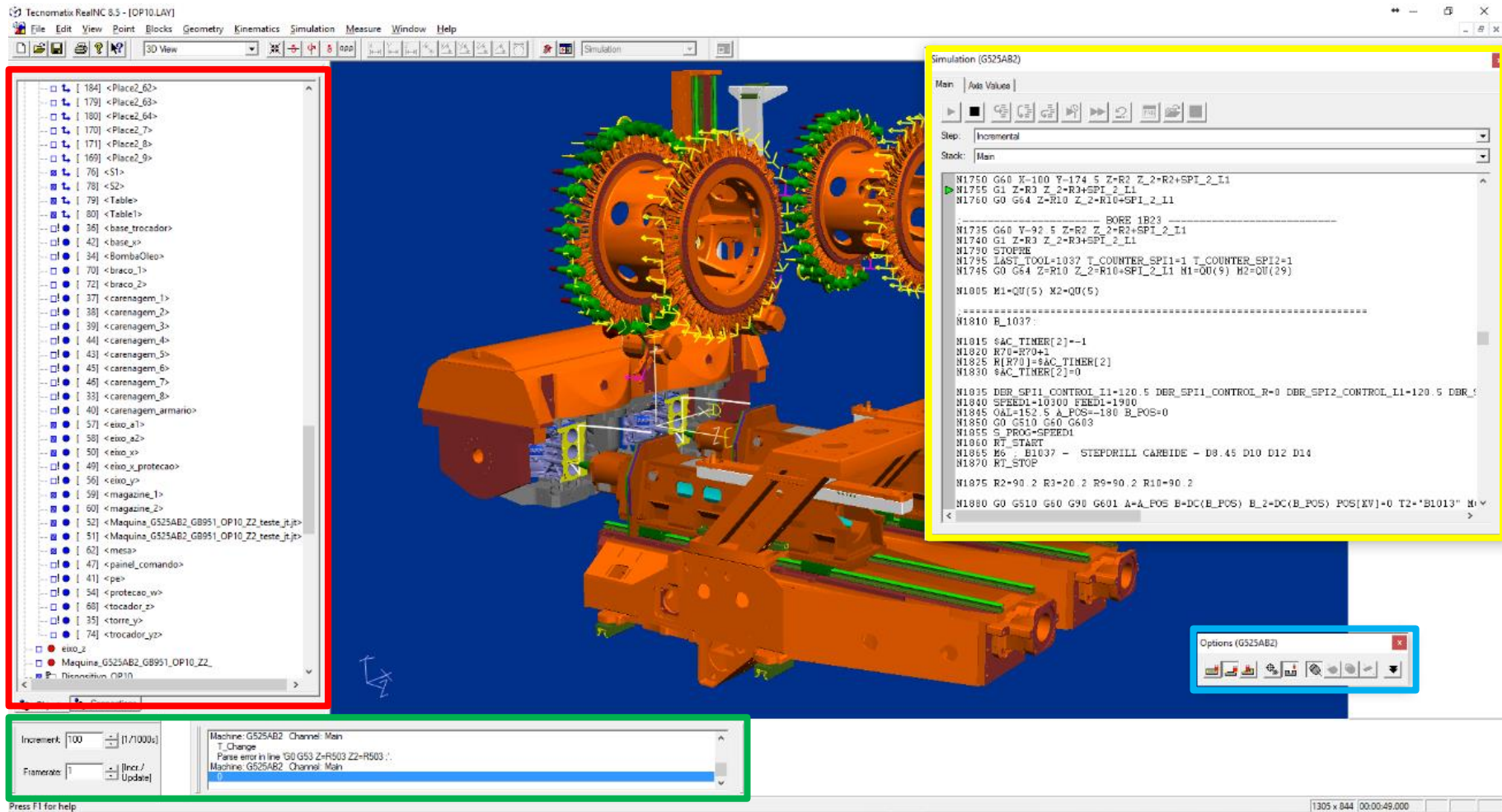


Figura 2.6: Ambiente de Trabalho do Software RealNC®.

2.2.2 NX® CAM

O *software* NX® CAM oferece recursos para programação da manufatura, desde um programa simples (fresamento ou torneamento) até uma usinagem multi-eixos e HSM (*High Speed Machining*). Também oferece o pós-processamento dos programas NC genéricos totalmente integrado, o qual gera programas NC específicos para uma variedade de máquinas-ferramenta CNC, desde que o pós-processador para os comandos numéricos dessas máquinas estejam disponíveis. Para a validação do programa NC, o NX® CAM conta com recursos de simulação que variam desde a verificação básica do caminho da ferramenta até a simulação “*As Built*” da máquina-ferramenta orientada por código G. Assim como o RealNC®, o NX® CAM possibilita a validação e detecção de erros do programa NC pós-processado, verifica tempos de usinagem e também verifica colisões da ferramenta com a peça, elementos de fixação e outros dispositivos que estejam sendo utilizados [28,29,30].

A Figura 2.7 mostra o ambiente de trabalho do NX® CAM dentro de uma simulação de usinagem de uma peça.

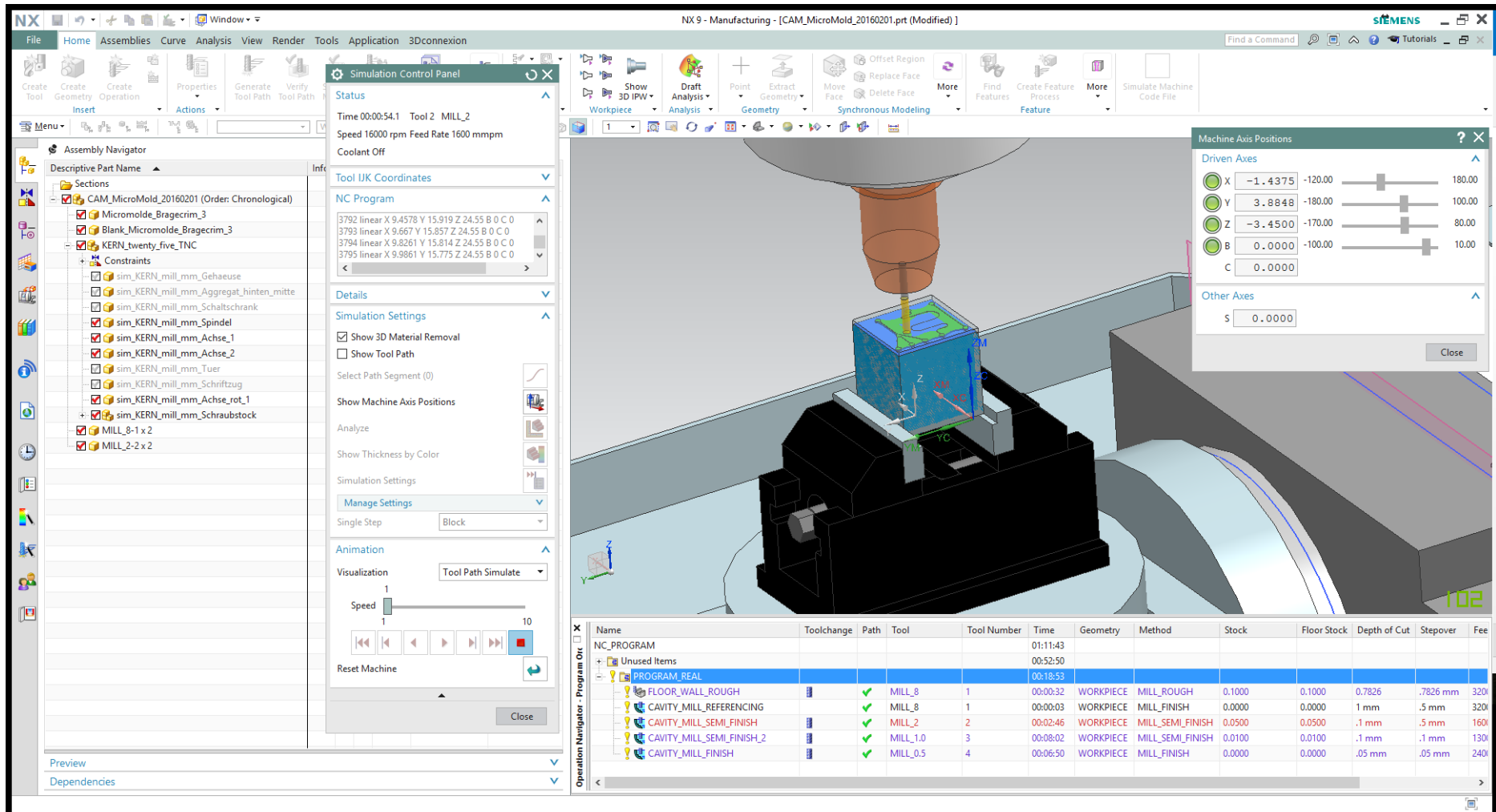


Figura 2.7: Ambiente de trabalho do NX CAM para simulação de usinagem

2.3 Parâmetros de Máquinas-Ferramenta

Para o funcionamento de uma máquina-ferramenta, o controlador NC é adaptado às características específicas de cada máquina e às necessidades do usuário. Para uma melhor qualidade e controle dos eixos é realizada a parametrização dos eixos, *spindels*, sistemas de medição e malhas de controle. Para o uso mais eficiente, a maioria das máquinas-ferramentas utilizam motores lineares em conjunto com controladores digitais aplicados. Esse conjunto consegue alcançar alta qualidade de controle mesmo em altas velocidades, pelos baixos valores de erro de *lag*, alto valor do Fator de Kv e alta precisão de posicionamento. Com isso é possível atender a demanda dos acionadores, assim como as altas velocidades de processamento e com maior precisão na trajetória da ferramenta [31].

Para o controle de velocidades dos eixos da máquina-ferramenta os parâmetros físicos estão diretamente relacionados. Estes parâmetros são, respectivamente; a trajetória $s(t)$, velocidade $v(t)$, aceleração $a(t)$ e o *jerk* $J(t)$. Cada parâmetro, na ordem mencionada, tem o resultado em função da diferencial do seu respectivo antecessor em função do tempo, assim como mostra a Equação (1) [32].

$$J(t) = \frac{da(t)}{dt} = \frac{d^2v(t)}{dt^2} = \frac{d^3s(t)}{dt^3} \quad (1)$$

Para um melhor controle dos limites físicos da máquina ferramenta e minimização de erros de contorno e de posicionamento de eixos, os limites de aceleração, da desaceleração e do *jerk* são previamente especificados e configurados no comando da máquina. O segmento do caminho da ferramenta é quebrado em pequenos segmentos nas direções dos eixos no intervalo de tempo da interpolação [32,33].

2.3.1 Velocidade e Aceleração para um Perfil Trapezoidal

Primeiramente definindo o perfil de velocidade trapezoidal para controle da aceleração e desaceleração dos eixos da máquina-ferramenta, sem limitação de *jerk*

(considerado instantâneo). Este perfil considerado somente para uma implementação computacional. A quantidade de interações da interpolação é dividida em três fases: aceleração (N1), velocidade constante (N2) e desaceleração (N3), conforme apresenta a Figura 2.8.

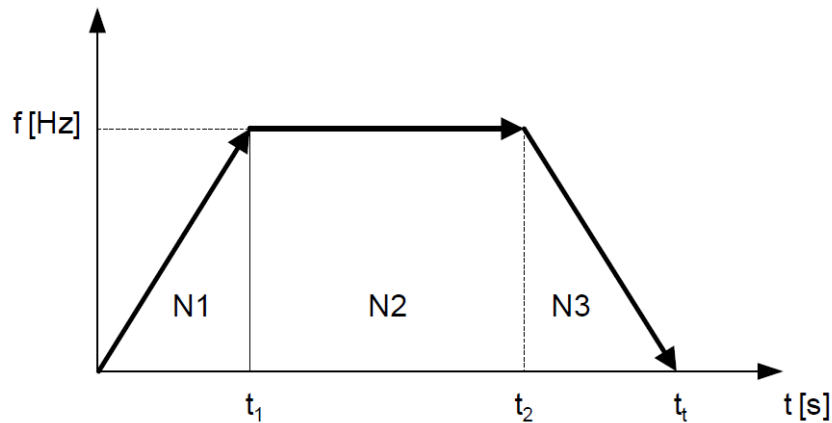


Figura 2.8: Perfil de velocidade trapezoidal, adaptado de Altintas [33]

O perfil de velocidade trapezoidal gera taxas de aceleração e desaceleração constantes, causando variações no *jerk* no início do movimento, e nos momentos t_1 , t_2 e t_t , momentos de transição da movimentação apresentados na Figura 2.8 [33].

O perfil trapezoidal de velocidade é fácil de ser implementado na maior parte das máquina-ferramenta, porém a geração desse perfil somente pode ser alcançada com interpolações lineares, pois uma vez que isso emprega somente aceleração constante, o *jerk* é considerado igual a zero, causando várias oscilações e ruídos na velocidade e aceleração quando se é necessário realizar diferentes interpolações (Circular ou Splines, por exemplo). Isso ocorre quando o avanço tem uma aceleração muito brusca, produzindo um torque muito forte do motor no fuso de esferas, com isso causando vibrações estruturais dinâmicas indesejáveis [33].

Para se obter perfis de velocidades e acelerações mais suaves, os controladores utilizam de algoritmos de geração da trajetória da ferramenta com *Jerk* limitado, *Jerk* definido, o qual será abordado no próximo tópico [32,33].

2.3.2 Jerk

A tecnologia empregada na geração dos comandos para os acionamentos determina o comportamento da aceleração, e respectivamente, do *jerk*, que poderão influenciar no desempenho dinâmico da trajetória da ferramenta. Onde, por definição *jerk* é um termo para um aspecto específico do deslocamento, a variação da aceleração em função do tempo, assim como mostra a Equação (2), o *jerk*, em sua concepção é a derivada da aceleração [34,33].

$$J(t) = \frac{da(t)}{dt} \quad (2)$$

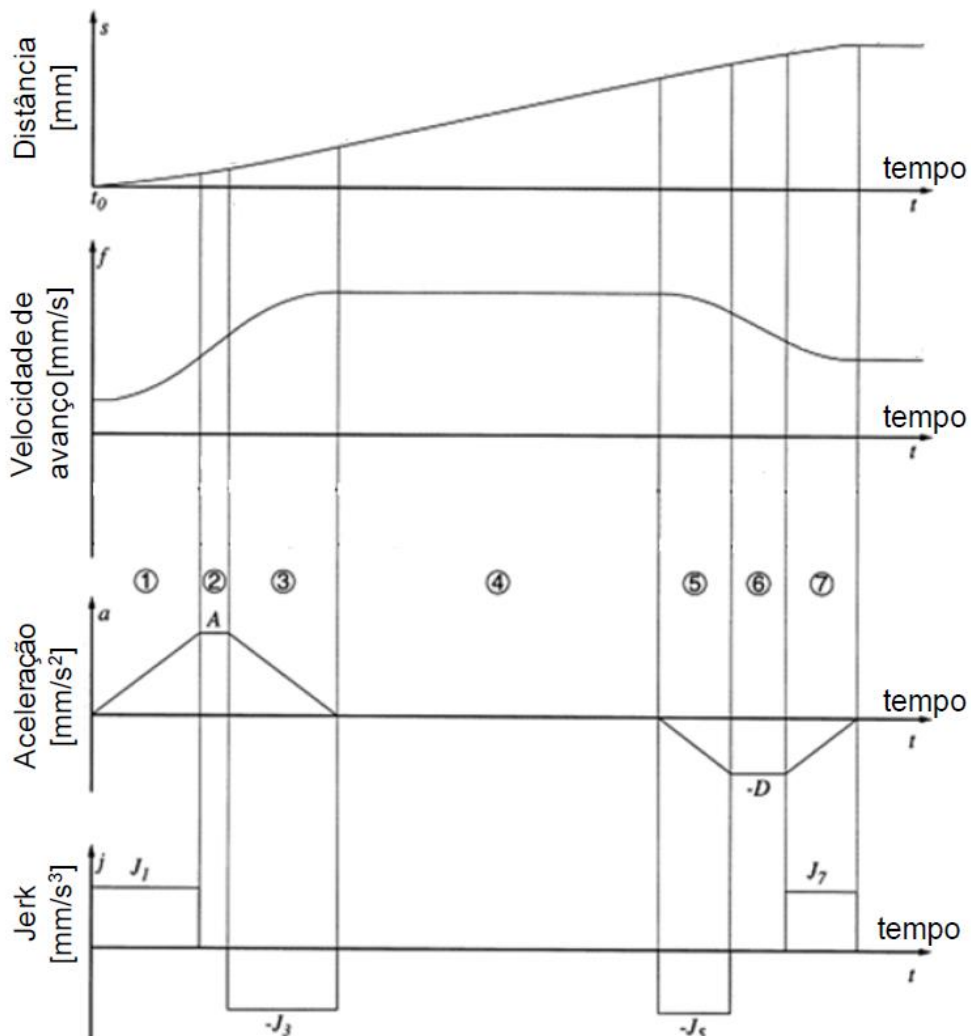


Figura 2.9: Perfis cinemáticos para geração de velocidade de avanço com perfil de Jerk Limitado, adaptado de Altintas [33]

Antes do início do bloco de movimentação NC, os valores iniciais e finais de posição, avanço, máxima aceleração e desaceleração e o limite de *jerk* são definidos. Os limites máximos de aceleração e desaceleração são calculados pelos limites de torque e força máximos dos motores [33].

Assim como ilustra a Figura 2.9, o limite do *jerk* é definido pela aceleração máxima do motor dividido pelo tempo de aceleração. O tempo de aceleração é uma constante de tempo que depende dos períodos de pico de torque/força fornecidos pelo amplificador do sinal. Portanto a aceleração pode ser obtida pela integração do *jerk*, a velocidade pela integração da aceleração e a distância pela integração da velocidade, todos em função do tempo [33].

2.3.3 Fator Kv

Um dos parâmetros mais importantes, que influenciam no comportamento dinâmico dos servo-motores para máquinas-ferramenta CNC, é o ganho da malha de controle de posição ou fator Kv. Este fator descreve o comportamento dinâmico para o circuito de controle de posição dos atuadores com motores lineares. O fator Kv é a razão entre a velocidade atual (v) com a variação de posição ($\Delta x = x_{alvo} - x_{real}$), assim como mostra a Equação (3) [31,35].

$$K_V [s^{-1}] = \frac{v [mm/s]}{\Delta x [mm]} \quad (3)$$

Em outras palavras, o fator Kv é a medida de exatidão da máquina em um processo de usinagem com curvas no plano ou mesmo no espaço. A ocorrência do erro de posicionamento na peça é proporcional a: $\frac{v}{K_V}$ [31].

Em máquinas-ferramenta multi-eixos o erro de contorno da trajetória pelos diferentes eixos pode causar diferença na forma usinada. A elevação do valor de Kv traz uma resposta mais rápida do sistema e maior precisão. Porém o ganho máximo permitido é limitado devido a ocorrência de reações oscilatórias indesejáveis com Kv elevados [35].

O ajuste do Kv, normalmente, é realizado experimentalmente na máquina-ferramenta já montada. Por esse motivo, máquinas de mesmo modelo podem apresentar diferentes valores de Kv para os eixos [35].

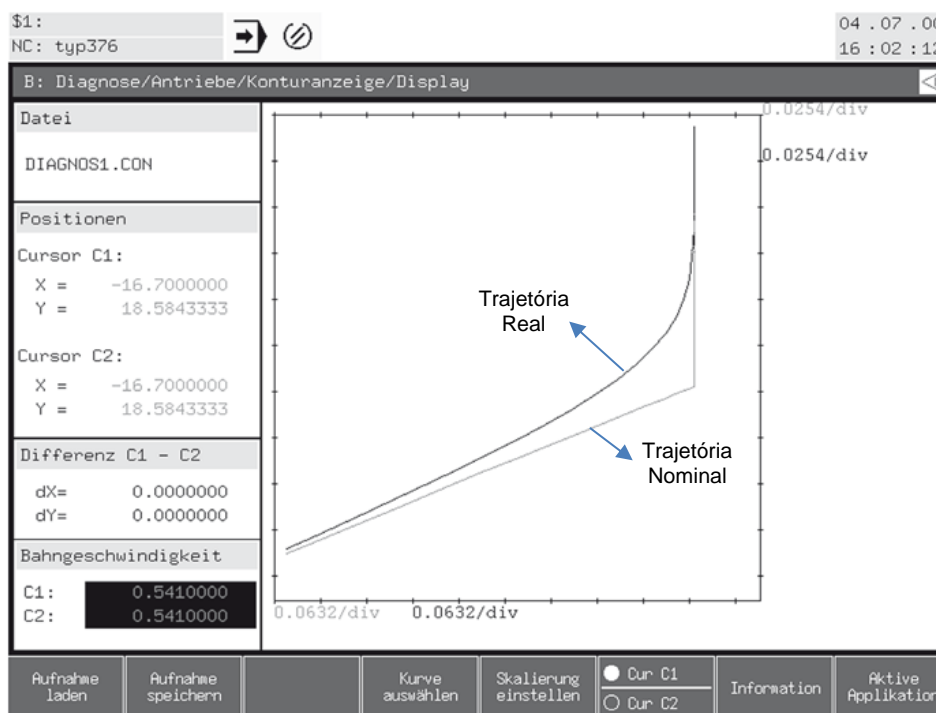


Figura 2.10: Reação do sistema de controle da máquina durante o teste para verificação da trajetória real em comparação a nominal [32]

O teste de verificação do Kv da máquina é disponibilizado por alguns fabricantes de máquinas para otimização do controle. O comando da máquina realiza uma função de distância-tempo, definida pelo sistema de controle da máquina. Essa função mostra, graficamente, o erro de contorno da trajetória real em comparação com a trajetória nominal [32].

2.4 Planejamento do Processo

O planejamento do processo é uma etapa importante para alcançar a concepção do ciclo de manufatura completo. É a conexão entre o projeto do produto e a manufatura. O planejamento é realizado para a definição dos detalhes do processo produtivo (usinagem, soldagem, fundição...) que transformarão o material bruto no produto com o formato desejado, o qual foi previamente definido pelo projetista nos desenhos do

produto. O planejamento do processo pode ser definido como um procedimento de determinação dos métodos e da sequência da manufatura de um componente de acordo com o especificado no projeto [36,37].

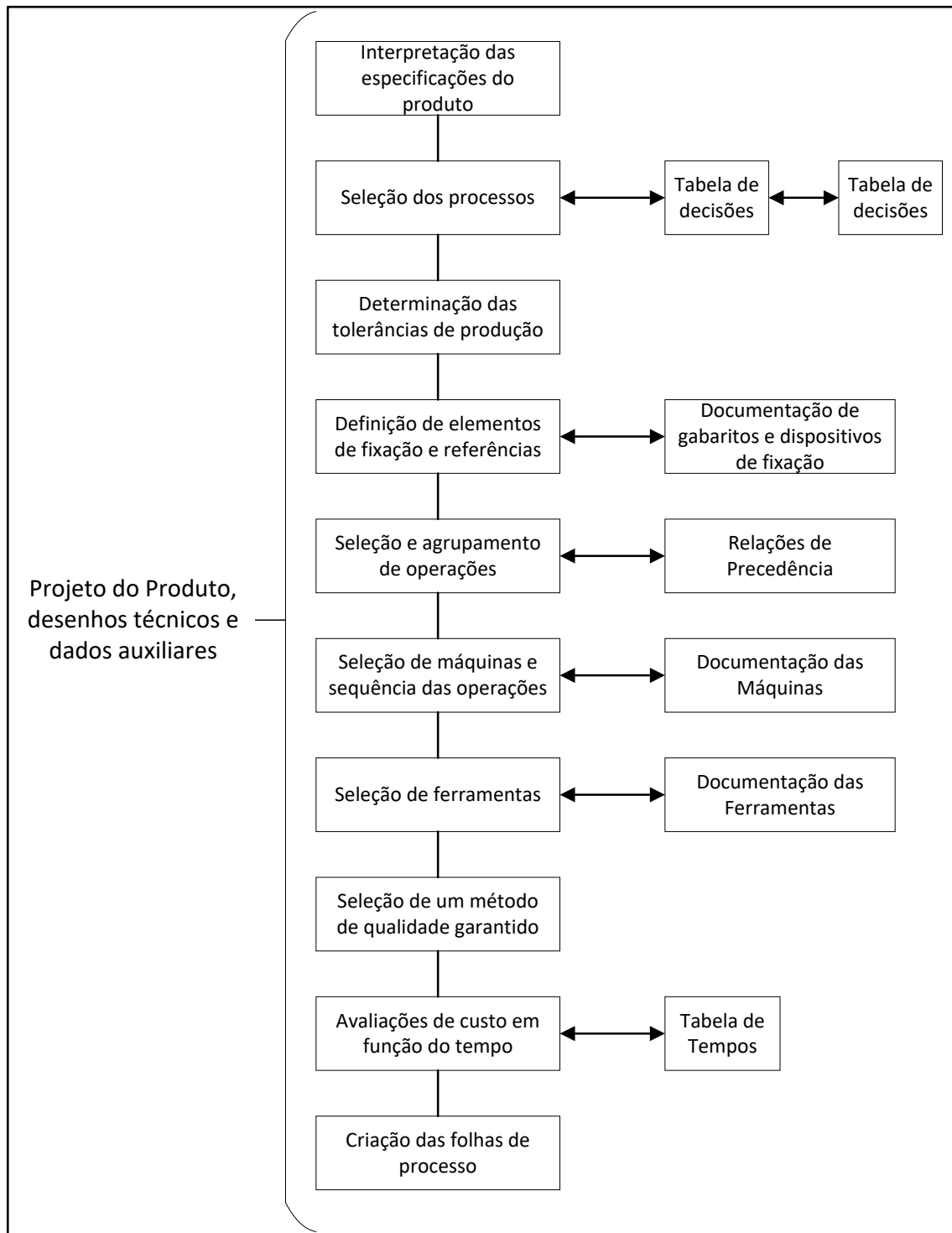


Figura 2.11: Tarefas para o Planejamento do Processo, adaptado de Halevi [37]

Apesar da importância do planejamento do processo no ciclo de manufatura, não existe uma metodologia formalizada nas normas disponíveis que possa ser utilizada na sua elaboração. Por esse motivo, o planejamento das atividades depende muito da experiência e das habilidades intuitivas do responsável pelo planejamento do processo, podendo ser considerado um processo empírico para determinação da sequência das operações de fabricação necessárias [37].

Algumas sequências de tarefas que definem a atividade de planejamento do processo. A Figura 2.11 mostra uma sequência de tarefas que pode auxiliar na atividade do planejamento do processo, a qual não necessariamente precisa ser realizada nessa ordem apresentada [37].

Basicamente, essas tarefas apresentadas na Figura 2.11 consistem respectivamente em [37]:

- Interpretação das especificações contidas nos desenhos técnicos do produto, sendo principalmente:
 - Projeções e vistas da peça, com dimensões e respectivas tolerâncias dimensionais e geométricas;
 - Projeções e vistas do material bruto, com dimensões;
 - Rugosidade superficial das superfícies;
 - Tipo e especificações do material;
 - Quantidade de peças a serem produzidas;
 - Outras especificações – tratamento térmico, dureza, camada de proteção, balanceamento da peça, entre outros.
- Determinação dos processos e ferramentas que realizam a manufatura do produto e suas características, respeitando as restrições impostas no projeto;
- Determinação das dimensões intermediárias e das tolerâncias de produção;
- Seleção das superfícies base e referências juntamente com a definição dos dispositivos de fixação para assegurar uma execução precisa das operações;
- Sequenciamento das operações de acordo com a relação de precedência e restrições tecnológicas;
- Balanceamento das operações nas máquinas da linha de produção de acordo com as restrições do processo, máquina e o tempo de ciclo da linha;

- Seleção dos métodos e equipamentos para inspeção do produto;
- Determinação das condições do processo para operação, possibilitando o cálculo de tempo e custos de processo, para realizar uma avaliação financeira;
- Edição das folhas de processo para montagem de um arquivo do planejamento do processo, o qual é transferido para o setor de manufatura para a execução.

2.5 Balanceamento de linha de produção

Dentro do contexto de Gestão da Produção, uma das técnicas mais importantes aplicadas na gestão do arranjo físico, é o balanceamento de linha de produção. O balanceamento busca otimizar e sincronizar os processos produtivos e simplificar a gestão, possibilitando a maximização da utilização dos equipamentos da linha e atendendo as necessidades da demanda nas quantidades e datas solicitadas [38,39].

Uma linha de produção é formada por uma sequência de postos de trabalho, ou seja, são etapas, que vão permitir a construção do item a ser fabricado. Os postos compõem as estações, as quais, são dependentes entre si, cada qual com função bem definida e voltada à fabricação ou montagem de um produto [39].

Balancear uma linha de produção é ajustar as capacidades produtivas, para que haja equivalência entre as capacidades dos equipamentos na linha, maximizando a utilização dos equipamentos, minimizando desperdícios, considerando atender diferentes produtos, ou variações de um mesmo tipo de produto [39,40].

Tubino [41] descreve objetivo principal do balanceamento de linha montagem, fazer com que as estações de trabalho tenham o mesmo tempo de ritmo para a produção do produto acabado, e que esse ritmo seja associado a demanda do mercado. O balanceamento de linhas de manufatura leva a mesma lógica utilizada para linhas de montagem [41].

Segundo Fernandes e Godinho Filho [42], o principal problema de uma linha de montagem é conhecido como ALBP (*Assembly Line Balancing Problem*), que é relacionado a atribuição de tarefas as estações de trabalho, de tal forma que as

restrições de precedência sejam respeitadas e alguma medida de eficiência seja otimizada.

O desbalanceamento de linha (ou perda de balanceamento) resulta em um desperdício de tempo devido a desigualdade na alocação dos trabalhos nas etapas dos processos produtivos. Este desperdício é definido como parte do percentual do tempo total do processo de produção do produto não utilizado para fins produtivos. Essa medida é utilizada para avaliar o projeto detalhado do layout de produção [43].

2.5.1 Tipos de desperdícios

O desperdício é definido como a atividade que não agregue valor no processo [43]. Os desperdícios são relacionados às atividades ao longo do processo de produção que param ou retardam o processo de fabricação do produto [44]. A filosofia enxuta tem como principal foco a eliminação de qualquer forma de desperdício, inclusive o de tempo [43].

A eliminação do desperdício pode ocorrer quando a atividade não é necessária para a fabricação do produto. Um dos mecanismos usados no aprimoramento enxuto tem como primeiro passo a identificação destas atividades. São os “sete tipos de desperdício”, que podem ser focados [45,43]:

- Superprodução: Produzir mais que o solicitado pela demanda ou para o próximo processo na produção. É a maior fonte de desperdício, segundo o sistema Toyota;
- Tempo de espera (ou tempo disponível): Tempo ocioso de uma máquina ou operador. As medidas mais comuns utilizadas para avaliar o tempo de espera são eficiência da máquina e de mão-de-obra;
- Transporte: A movimentação de materiais dentro da fábrica não agrega valor. Mudanças no arranjo físico, aprimoramento nos métodos de transporte e na organização do local de trabalho, podem reduzir desperdícios;
- Processo: No processo pode existir o desperdício dado por operações em componentes, existentes em função de projeto mal planejado ou manutenção falha, podendo ser corrigidas e eliminadas;

- **Estoque:** O estoque deve ser alvo para a eliminação, porém o estoque deve ser sempre eliminado a partir de sua causa;
- **Movimentação:** As movimentações que não agregam valor no processo produtivo são sempre alvo para ganho produtivo. A simplificação das tarefas é uma fonte para redução do desperdício;
- **Produtos defeituosos:** Processamento de produtos defeituosos aumentam os custos totais por necessidade de retrabalho ou descarte.

Este trabalho foca três desses sete tipos desperdícios. Dois desses tipos se encaixam indiretamente; os desperdícios de processo e de movimentação. Eles podem ser os quais podem ser minimizados ou até eliminados com o auxílio da simulação de máquinas-ferramenta, realizando melhorias nos processos de usinagem e eliminando movimentos em vazio que são desnecessários. Porém a melhoria desses dois tipos de desperdícios pode ocasionar o terceiro tipo, que é tempo disponível ou tempo ocioso, pode ocasionar um desbalanceamento na linha. Esse trabalho vem com a proposta de um método para eliminar o desbalanceamento de linha.

2.5.2 Indicadores utilizados no balanceamento da linha

Uma linha de produção ou montagem consiste de uma série de estações de trabalho ou operações. Cada estação de trabalho tem um intervalo de tempo entre a entrada e saída do produto, chamado tempo de ciclo (T_c). O tempo de ciclo é o tempo necessário para completar o ciclo de uma operação, este é representado pela Equação (4), onde, T_p é o tempo de produção da operação e N_p é a quantidade de produtos no tempo de produção. O tempo de ciclo das operações é o tempo limitante para o *Takt-time* [46,47].

$$T_c = \frac{T_p}{N_p} \quad (4)$$

Cada estação ou operação pode ser composta de múltiplas tarefas. Estas tarefas são agrupadas de modo a obedecer uma relação de precedência entre elas, qual seja, as tarefas são agrupadas respeitando regras de precedências entre operações [46].

O tempo de ciclo da linha é o tempo de execução da operação na máquina, ou estação de trabalho mais lenta. Este é quem determina o ritmo máximo permissível na configuração da linha [48]. Este é o limitador da capacidade da linha considerado o gargalo.



Figura 2.12: Esquema de uma linha com determinação dos tempos de ciclo, adaptado de Dilworth [49]

A Figura 2.12 mostra os conceitos de tempo de ciclo e gargalo na linha de produção. O tempo de ciclo de cada operação é a somatória dos tempos de suas tarefas. Considerando que seja uma linha com uma máquina por operação, o tempo de ciclo da linha (gargalo) é o da operação 2, limitando a 5,5 minutos o tempo para a entrega de uma peça.

Outro conceito usado para o planejamento do processo é o *Takt-time* (T_{takt}). A análise do *Takt-time* é muito utilizada nas indústrias. *Takt-time* é definido a partir tempo disponível de produção (T_D) em função da demanda de mercado (D). O tempo disponível de produção é tempo total de produção subtraído pelos tempos de paradas programadas. Em outras palavras o *Takt-Time* representa o ritmo de uma linha de produção, suficiente para o atendimento à solicitação da demanda de mercado. A Equação (5) demonstra matematicamente a razão que resulta no *Takt-time* [50,48].

$$T_{takt} = \frac{T_D}{D} \quad (5)$$

A análise do *Takt-time* resulta na fácil visualização e compreensão dos tempos de ciclo do processo e relaciona-os com a demanda [51]. Com isso, auxilia na identificação dos gargalos no fluxo da produção [50]. A Figura 2.13 mostra a relação do *Takt-time* para auxiliar a compreensão dos tempos de ciclo na linha produtiva,

demonstrando que o gargalo encontrado na OP2 faz com que a linha não atinja a demanda solicitada.

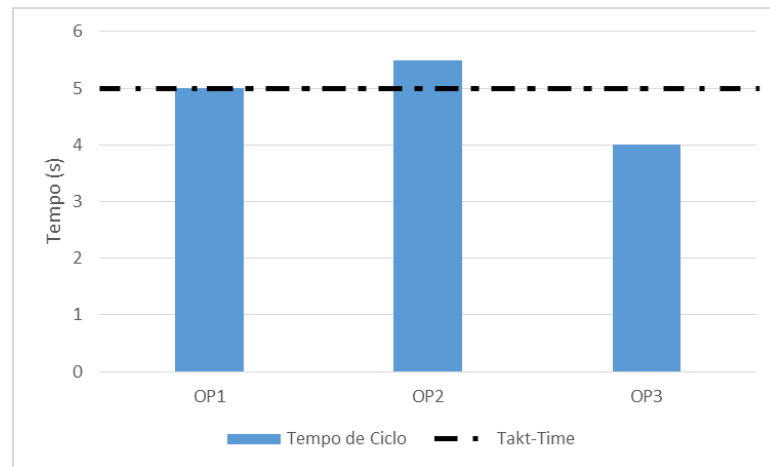


Figura 2.13: Relação Takt-time x Tempo de Ciclo

2.5.3 Gargalos

Gargalos são geralmente reconhecidos como os recursos ou serviços que limitam o desempenho de um sistema de produção. [52] Segundo o conceito da Teoria das Restrições (*TOC – Theory of Constraints*), a máquina com a menor taxa de produção é o limitante para o sistema. Esta máquina será chamada de gargalo. A operação 2 da Figura 2.12 é considerada o gargalo dessa linha, pois limita a saída do sistema. O *TOC* foca no gerenciamento das fontes de gargalos, para que seja possível entregar maior ganho para a empresa [53].

Diversas definições que contribuem para a determinação de um gargalo em linha de produção podem ser encontradas na literatura. Estas definições existem pelas diferentes exigências de aplicação e nos diferentes métodos de produção [52]. Algumas das definições encontradas na literatura são [54]:

- Pontos de congestionamento ocorrem primeiramente quando os recursos de manufatura requeridos em um determinado período de tempo estão indisponíveis;
- Capacidade do recurso, quando essa é menor que a demanda definida. Ou seja, o processo limita o rendimento;

- Gargalos de produção são geralmente considerados como bloqueios temporários na produção elevada;
- A instalação, operador, departamento, etc. impedindo a produção;
- Qualquer operação limitante da produção.

A partir dessas definições, podemos ver a diversidade dos pontos de gargalos que podem ser encontrados em uma linha. Eles não são apenas causados por limitações físicas, tais como o recurso, processo, instalação, etc., mas também influenciada pela função, operador, etc. Alguns gargalos podem aparecer temporariamente e alguns podem permanecer fixos [52].

Um senso comum sobre gargalo é definido como somente "algo" que limita a taxa de produção do sistema. Visando proporcionar uma orientação prática para perspectiva de aplicação, um dos métodos para definir o gargalo é pelo método baseado na sensibilidade (*Sensitivity Based*), o qual tem como foco encontrar a máquina cujo rendimento afeta principalmente o rendimento global do sistema produtivo [52].

Para esse trabalho será necessário a verificação das máquinas gargalos em uma linha de usinagem. Na linha de usinagem, cada operação é composta por uma diferente quantidade de centros de usinagem. Para isso deverão ser comparadas as distribuições de ferramentas alternativas para toda a linha. É necessário encontrar um rearranjo eficiente uma maneira capaz de comparar as distribuições alternativas entre si, logo que a simples comparação dos tempos de ciclo não fornece uma boa base para avaliação, pela complexidade da linha.

Dessa forma, mesmo que as operações estejam com os tempos de ciclo a abaixo do *Takt-time*, o gargalo será considerado na produção como em elemento que tem diferente tempo de ciclo. Então um ponto de gargalo pode ser considerado quando é caracterizado como espera ("*Starved*", falta de peças nas estações de trabalho) ou bloqueio ("*Blocked*", suprimento em excesso para as estações de trabalho) mais forte em consideração com as outras estações [55].

Este trabalho também não levará em consideração a definição de *buffers*, alterações nos tipos dos processos, mudanças nos transportes entre estações ou mesmo tipos de produção. Nesse sentido, estará focado no balanceamento das ferramentas entre

operações, portanto os gargalos serão evitados com o nivelamento de execução das etapas do processo produtivo, de modo que o momento em que uma operação termina uma peça, a próxima já esteja apta a recebê-la, com o mínimo possível de tempo de bloqueio ou espera.

2.5.4 Técnicas para detecção de gargalos

A literatura mostra diversas abordagens para a detecção de gargalos. Betterton e Silver [55] apresentam em seu trabalho uma revisão da literatura com oito dos métodos básicos para a detecção de gargalos em linhas, estes estão apresentados no Figura 2.14.

Para a realização desse trabalho foram escolhidos dois dos métodos apresentados, por se encaixarem melhor no estudo. Os métodos de Seta (*Arrow*) e Ponto de Giro (*Turning Point*) [56].

Método
Utilização (<i>Utilisation</i>)
Tempo Ativo (<i>Active Period</i>)
Tempo Inativo (<i>Inactive Period</i>)
Seta (<i>Arrow</i>)
Ponto de Giro (<i>Turning Point</i>)
Tempo de Espera Médio (<i>Average Waiting Time</i>)
Maior Tempo de Espera (<i>Longest Waiting Time</i>)
Maior Fila (<i>Longest Queue</i>)

Figura 2.14: Métodos de detecção de gargalos, adaptado de Betterton e Silver [55]

2.5.4.1 Método de seta (*Arrow*)

Este método recebe este nome pois está diretamente relacionado ao desenho de setas apontando para as operações adjacentes, a qual compara e aponta a seta para a estação que tem maior índice de bloqueio e espera. Este método ainda utiliza duas regras relacionadas para a identificação dos gargalos [55].

A primeira regra é para indicação do gargalo. Segundo essa regra, se, a frequência de bloqueio (m_b) na estação (i) for maior que a frequência de espera (m_s) para a estação ($i + 1$), o gargalo é considerado um *downstream* da estação (i), então a direção da seta será da estação (i) para a estação ($i + 1$). Se, a frequência de bloqueio (m_b) na estação (i) for menor que a frequência de espera (m_s) para a estação ($i + 1$), o gargalo é considerado um *upstream* da estação (i), então a direção da seta será da estação ($i + 1$) para a estação (i). As Equações (6) e (7) representam, respectivamente, as regras apresentadas acima [55,57].

$$m_{b_i} > m_{s_{i+1}}, \quad i = 1, \dots, M - 1 \quad (6)$$

$$m_{b_i} < m_{s_{i+1}}, \quad i = 1, \dots, M - 1 \quad (7)$$

Se, após a determinação do gargalo a partir da primeira regra, forem encontrados múltiplos gargalos, então o gargalo principal será definido com auxílio da segunda regra. A segunda regra é referente a severidade do gargalo (*Bottleneck severity*). S_i é dado como a medida para a severidade do gargalo na máquina i (estação), assim como na regra anterior, m_b é o bloqueio na manufatura, m_s é a espera na manufatura, e M é o número de máquinas na linha produtiva. Com isso a severidade é definida a partir da Equação (8) [57].

$$S_i = (m_{b_{i-1}} + m_{s_{i+1}}) - (m_{b_i} + m_{s_i}), \quad i = 2, \dots, M - 1 \quad (8)$$

O método *Arrow* baseado na comparação das estatísticas de simulação do bloqueio e da espera das máquinas vizinhas, sendo capaz de avaliar vários gargalos. O gargalo de maior gravidade é o local de trabalho com o valor máximo do índice específico [58].

Uma desvantagem deste método é sua baixa confiabilidade para encontrar um gargalo, se ele estiver localizado no início ou no final da linha de produção [58].

2.5.4.2 Ponto de Giro (Turning Point)

O “ponto de giro” é um método indireto para identificar gargalos com base em informações obtidas no chão de fábrica. Este método é definido como a máquina onde a tendência de boqueio e espera mudam, ou seja, o bloqueio da máquina ser maior que a sua porcentagem de espera, para a máquina seguinte ter sua porcentagem de tempo de espera maior que a porcentagem do tempo de bloqueio. Ou seja, quando o bloqueio e a espera invertem-se de uma estação para a seguinte. A Figura 2.15 indica os *turning points* encontrados nessa linha pelas setas. Além disso, a soma de espera e bloqueio de um ponto de giro de uma máquina é menor do que as máquinas adjacentes [59].

As máquinas encontradas como ponto de giro são as máquinas que tem menor tempo de inatividade (soma de espera mais bloqueio), ou seja, são as máquinas que utilizam maior tempo para gerar transformação na linha [53].

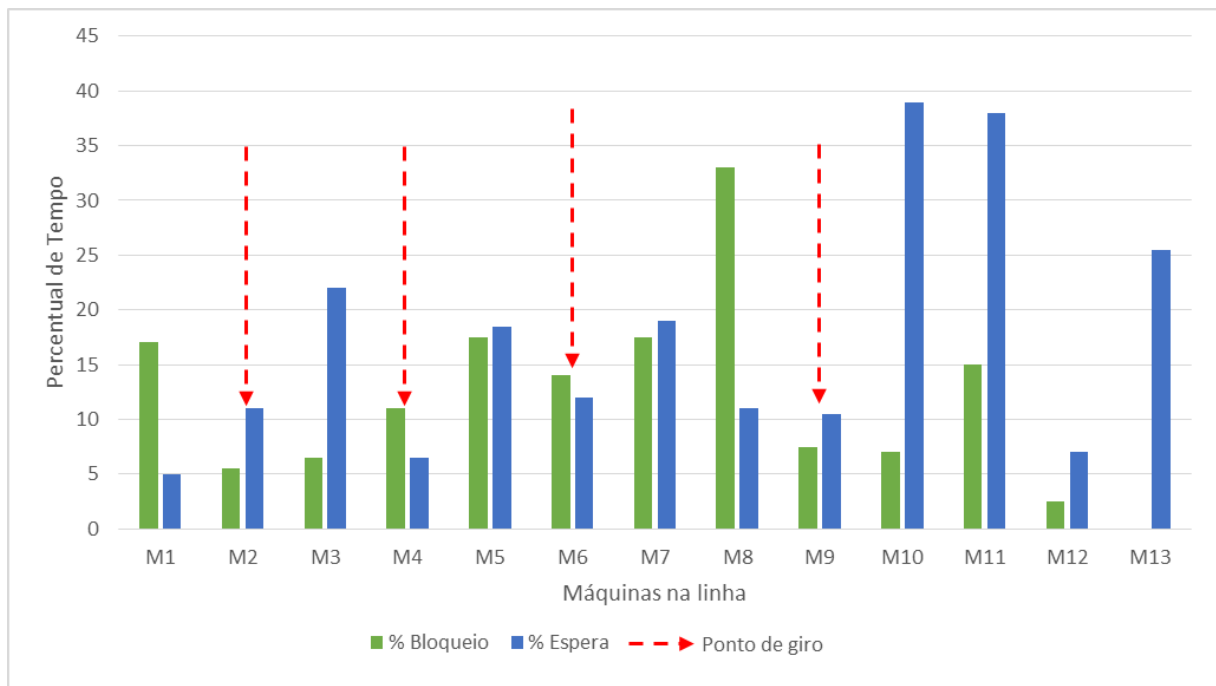


Figura 2.15: Exemplo de pontos de giro em uma linha, adaptado de Li, et al. [59]

A Figura 2.15 ilustra o seguimento de máquina M8 até M13 inicia com um bloqueio maior que a espera (M8) e nas máquinas seguintes (M9 até M13) a espera é maior

que o bloqueio. Além disto, a somatória de espera e bloqueio do ponto de giro da máquina M9 é menor do que as máquinas adjacentes (M8 e M10). A relação está representada pela Equação (9) [53].

$$TB_{M8} + TS_{M8} > TB_{M9} + TS_{M9} \ \& \ TB_{M10} + TS_{M10} > TB_{M9} + TS_{M9} \quad (9)$$

O mesmo procedimento de análise vale para as máquinas M2, M4 e M6, do exemplo.

Esse método pode identificar rapidamente o gargalo por meio da análise gráfica. Também pode ser analisado por meio da definição matemática, Equação (10), onde, j representa a máquina “Turning Point”, TB_j é o tempo de bloqueio da máquina j ; TS_j é o tempo de espera da máquina j ; $j-1$ é a máquina anterior mais próxima; e $j+1$ é a máquina seguinte mais próxima [59,58].

$$(TB_i - TS_i) > 0 : i \in [1, \dots, j-1], \quad j \neq 1, j \neq n$$

$$(TB_i - TS_i) < 0 : i \in [j+1, \dots, n], \quad j \neq 1, j \neq n$$

$$TB_j + TS_j < TB_{j-i} + TS_{j-i}, \quad j \neq 1, j \neq n$$

$$TB_j + TS_j < TB_{j+i} + TS_{j+i}, \quad j \neq 1, j \neq n \quad (10)$$

$$IF \ j = 1: (TB_1 - TS_1) > 0 \ \&$$

$$(TB_2 - TS_2) < 0 \ \& \ TB_1 + TS_1 < TB_2 + TS_2$$

$$IF \ j = n: (TB_{n-1} - TS_{n-1}) > 0 \ \&$$

$$(TB_n - TS_n) < 0 \ \& \ TB_n + TS_n < TB_{n-1} + TS_{n-1}$$

2.5.5 Técnicas de Balanceamento

As técnicas de balanceamento foram ao longo do tempo sendo desenvolvidas e aprimoradas de acordo com a solicitação de cada tipo de linha de produção, para a eliminação ou minimização dos gargalos na linha. Na prática, as abordagens comumente utilizadas são as heurísticas simples, no processo de balanceamento de

linha não seria diferente. Entre as técnicas existentes destaca-se a técnica de diagrama de precedência (*Precedence Graph*), que é usada na representação do ordenamento dos elementos ou tarefas que compõe o conteúdo do processo total de produção do produto. [43,46]

Outros métodos foram encontrados na literatura para auxílio no balanceamento da linha, assim como os métodos do Maior Candidato (MC) e *Ranking* Posicional de Pesos (RPP). Estes métodos, assim como outros, apresentam o diagrama de precedência como um pré-requisito para resolução do balanceamento de linha.

2.5.5.1 Diagrama de precedência

O projeto de uma linha de usinagem está relacionado com o planejamento do processo, no qual, a principal tarefa é determinar as correspondentes operações de usinagem para os elementos geométricos (*features*) do Produto. [60]

Para que o balanceamento não apresente nenhuma alternativa impraticável utilizado o diagrama de precedência (*PG – Precedence Graph*). Auxiliando na verificação das tarefas da linha que solicitem algum requisito anterior [61].

A técnica do diagrama de precedência é a representação do ordenamento dos elementos (operações) que compõem as tarefas ou etapas da manufatura total do produto. Cada operação da produção é representada por um círculo, que são conectados por setas que mostram o ordenamento com a precedência das operações. [43]

O diagrama de precedência é um diagrama acíclico dirigido² (*DAG – directed acyclic graph*), assim como mostra a Figura 2.16, onde N são os nós, ou melhor dizendo as operações (onde $N=1, 2, \dots, n_{\text{operações}}$) e A são as setas que fazem as ligações entre

² Um diagrama acíclico dirigido é um diagrama dirigido que não realiza ciclos, como por exemplo uma árvore de tarefas dirigidas [72]. No qual, o diagrama dirigido (Digraphs) é um diagrama com uma sequência de arestas (setas) com a propriedade de que o vértice de cada aresta na sequência tem o final como início da próxima aresta em sequência; cada aresta tem uma orientação determinada de um vértice ao outro [73]

os nós. Cada nó (círculo) representa uma operação, no qual, o nó i precede o nó j se tiver uma seta começando em i e terminando em j . Uma sequência de operações inclui todas as operações de uma linha e observa as relações de precedência entre sequências de operações viáveis da linha estudada [62].

A Figura 2.16(a) mostra a primeira classe de diagrama de precedência, com uma ordenação estritamente linear. Este diagrama pelo fato de ser estritamente linear, tem sempre o número de sequências de operações possíveis igual a 1 [60].

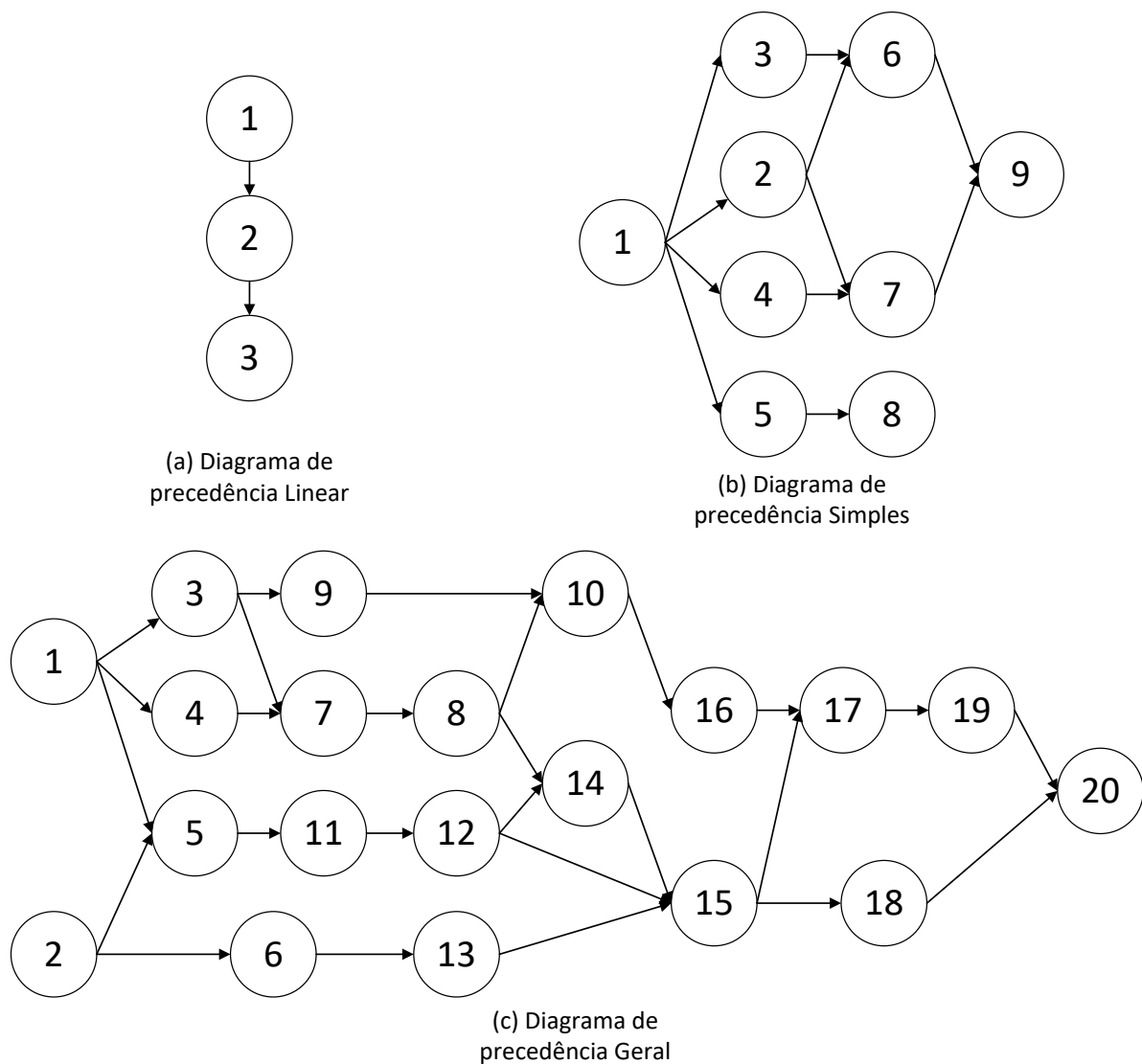


Figura 2.16: Diagramas de precedência, adaptado de Dou et al. [60]

Já a Figura 2.16(b) mostra uma classe de diagrama de precedência chamada de diagrama simples. Este tipo de diagrama contém poucas sequências de operações

possíveis. Segundo Dou et al. [60], o maior número possível de sequências, para essa classe, deve ser menor que um milhão de possibilidades [60].

A terceira classe de diagramas é um diagrama de precedência geral, como mostrado na Figura 2.16(c). Essa classe apresenta um grande número de nós. Este tipo de diagrama representa a maior parte dos problemas reais. O diagrama de precedência geral apresenta uma grande quantidade de sequências de operações possíveis, que essas, se não organizadas corretamente no diagrama de precedência, seria impossível mesmo para um computador (64 bits) enumerá-las em um tempo aceitável, pela grande quantidade de cálculos necessários. Por isso a realização de um diagrama de precedência se faz necessário para a verificação das possibilidades em um balanceamento de linha [60].

2.5.5.2 Ranking Posicional de Pesos

O método Ranking Posicional de Pesos (*RPW – Rank Positional Weight*) é uma regra para o sequenciamento de linhas. Consiste em um cálculo referente ao peso posicional de cada tarefa, levando em consideração as relações já determinadas com o auxílio do diagrama de precedência. Onde, o peso da tarefa é a somatório do tempo da tarefa e suas precedências [63].

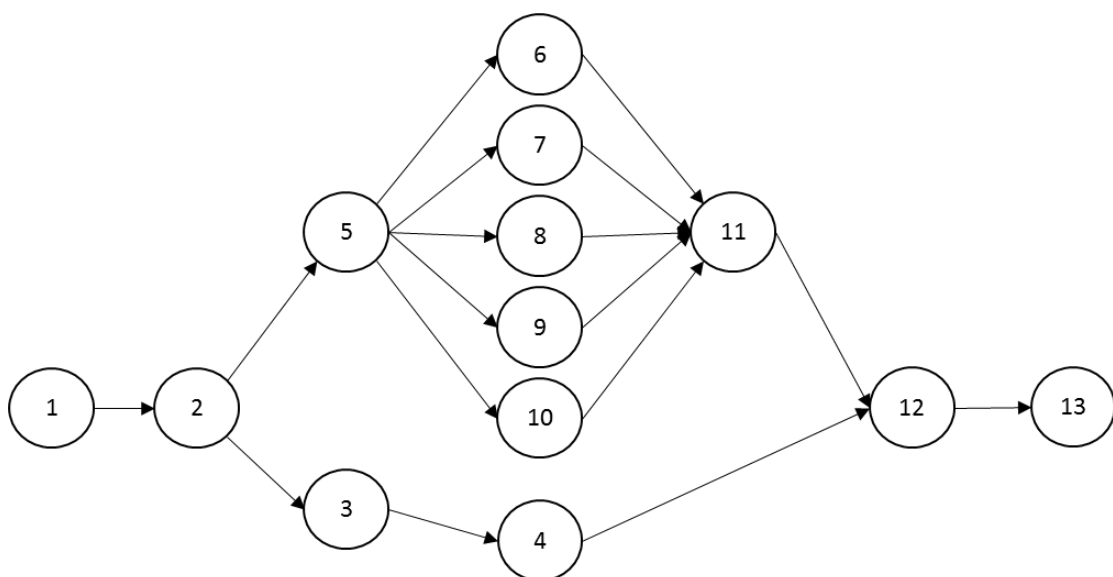


Figura 2.17: Diagrama de precedência com as tarefas e precedências, para aplicação do método RPW, adaptado de Ghutukade & Sawant [64]

A Figura 2.17 mostra o diagrama de precedência com as tarefas da linha já inter-relacionadas com suas tarefas precedentes.

Para iniciar a aplicação do método, é necessário realizar a construção de uma matriz com os tempos de cada tarefa da linha de produção e a indicação das respectivas precedências (Tabela 2.1). Estes tempos serão utilizado no cálculo dos *RPWs* [65,63,64].

Tabela 2.1: Tabela com as tarefas e seus respectivos tempos e precedências, para aplicação do método RPW, adaptado de Ghutukade & Sawant [62]

Tarefas e seus respectivos tempos e predecessores		
Elemento	Tempo (min.)	Predecessor
1	20	--
2	20	1
3	45	2
4	10	3
5	7	2
6	5	5
7	8	5
8	20	5
9	15	5
10	5	5
11	4	6,7,8,9,10
12	45	4,11
13	6	12

O primeiro passo para a realização do método é o cálculo dos pesos posicionais (*RPW*). Para calcular o *RPW* de cada tarefa é realizada a soma do tempo da tarefa “x” aos tempos de todas as suas tarefas precedentes do diagrama de precedência, ou seja, é o tempo total no caminho mais longo do início da tarefa até a última operação, como mostra a Tabela 2.2(a) [65,63,64].

O terceiro passo do método é referente a reordenação dos valores de *RPW* em ordem decrescente Tabela 2.2(b). O quarto, e último passo, se refere a atribuição dos elementos as estações de trabalho. Os elementos são selecionados a partir do *RPW* mais alto. Os elementos são atribuídos às estações de trabalho levando em consideração o tempo de ciclo e as relações de precedências, para que estes não sejam violados, a Tabela 2.2(c) mostra os elementos do exemplo atribuídos às estações de trabalho.

Tabela 2.2: Tabelas com os passos para a realização do método RPW, adaptado de Ghutukade & Sawant [64]

Passo 1 - Calcular o RPW para cada elemento				
a) Passo 1 - Calcular o RPW para cada elemento				
Elemento	RPW	Tempo (min.)	Predecessor	
1	210	20	--	
2	190	20	1	
3	106	45	2	
4	61	10	3	
5	115	7	2	
6	60	5	5	
7	63	8	5	
8	75	20	5	
9	70	15	5	
10	60	5	5	
11	55	4	6,7,8,9,10	
12	51	45	4,11	
13	6	6	12	

Passo 2 - Ordenar o RPW em ordem decrescente				
b) Passo 2 - Ordenar o RPW em ordem decrescente				
Elemento	RPW	Tempo (min.)	Predecessor	
1	210	20	--	
2	190	20	1	
5	115	7	2	
3	106	45	2	
8	75	20	5	
9	70	15	5	
7	63	8	5	
4	61	10	3	
6	60	5	5	
10	60	5	5	
11	55	4	6,7,8,9,10	
12	51	45	4,11	
13	6	6	12	

Passo 3 - Atribuir a tarefa à uma estação de trabalho				
c) Passo 3 - Atribuir a tarefa à uma estação de trabalho				
Workstation N.	Elemento	Tempo (min.)	Soma do tempo (min.)	
1	1	20		
	2	20		
	5	7		
	7	8	55	
2	3	45		
	4	10	55	
3	8	20		
	9	15		
	6	5		
	10	5		
4	11	4	49	
	12	45		
	13	6	51	

2.5.5.3 Maior Candidato

A regra de maior candidato (*LCR – Largest Candidate Rule*), segundo Praça [66], é um método que permite a obtenção do resultado em um menor tempo, se comparado com o método dos pesos posicionais. Entretanto, em problemas mais complexos o método de pesos posicionais permite melhores resultados [66].

Para a utilização desse método, primeiramente, deve-se listar as tarefas em ordem decrescente de tempo de processamento (Tabela 2.3a); próximo passo é realizar a atribuição às estações de trabalho (Tabela 2.3b) de acordo com a ordem definida

(Tabela 2.3a), sem violar as restrições de precedência e respeitando o tempo de ciclo da linha, até que todas as tarefas sejam distribuídas [67].

Tabela 2.3: a) tarefas reordenadas de acordo com os valores de tempo;
b) tarefas distribuídas às estações de trabalho.

Tarefa	Tempo	Predecessores
3	0,7	1
8	0,6	3,4
11	0,5	9,1
2	0,4	-
10	0,38	5,8
7	0,32	3
5	0,3	2
9	0,27	6,7,8
1	0,2	-
12	0,12	11
6	0,11	3
4	0,1	1,2

Estação	Tarefa	Tempo	T_c da Estação
1	2	0,4	1
	5	0,3	
	1	0,2	
2	4	0,1	0,81
	3	0,7	
3	6	0,11	0,98
	8	0,6	
4	10	0,38	0,59
	7	0,32	
5	9	0,27	0,62
	11	0,5	
	12	0,11	

A Figura 2.18 mostra um exemplo das tarefas atribuídas às estações de trabalho, de acordo com a reordenação realizada na Tabela 2.3(b) utilizando a regra, dentro do diagrama de precedência.

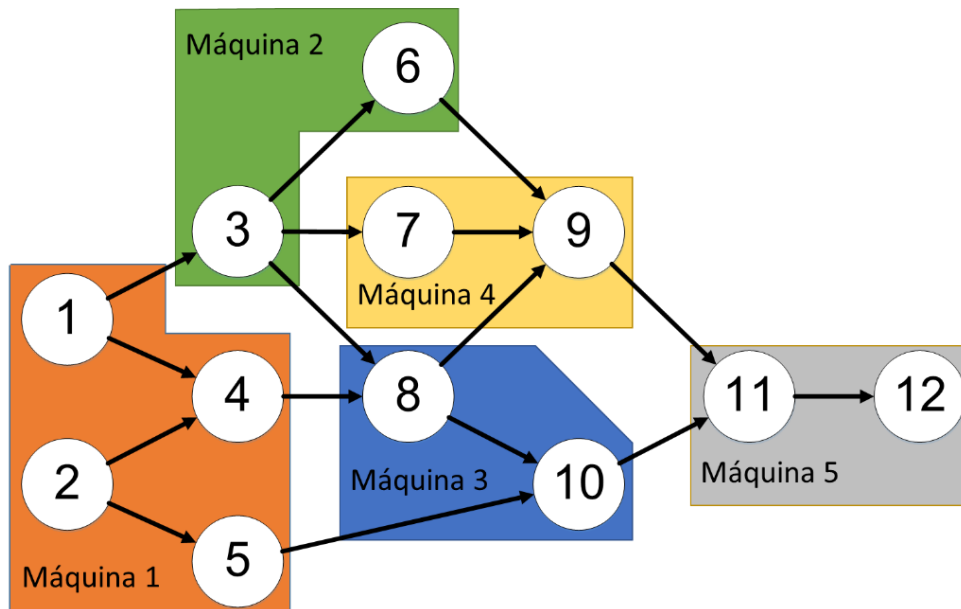


Figura 2.18: Exemplo de atribuição das estações de trabalho para as tarefas, adaptado de Reginato et.al [63]

2.5.6 Softwares para auxiliar o balanceamento de linha

No mercado existem diversos *softwares* que auxiliam no planejamento, construção, gerenciamento e validação de linhas de produção, que podem ser utilizados para facilitar a verificação do balanceamento de manufatura propostos.

Existem alguns *softwares* comerciais que podem auxiliar nesse processo, estes são o MLP® e Plant Simulation®, ambos *softwares* desenvolvidos pela Siemens, mas que tem diferentes aspectos de acordo com as suas funcionalidades.

2.5.6.1 MLP (Machine Line Planer)

O *Machine Line Planner*® é um *software* da linha Tecnomatix® da Siemens, assim como o *RealNC*®, porém este tem como principal foco o planejamento da manufatura para o projeto de linhas de usinagem para OEMs e integradores de usinagem em linha [68].

O *software* auxilia no projeto, programação, simulação e documentação das linhas de usinagem para proposta e implementação. A linha de usinagem é uma sequência otimizada das operações de produção, programadas para realizar a produção em alto volume de componentes complexos em máquinas dedicadas [68].

Para ajudar de forma otimizada a utilização dos seus recursos de usinagem, MLP oferece uma solução baseada no processo que simplifica e acelera o projeto e melhorias de linhas de usinagem. O MLP permite definir os detalhes de usinagem em cada *feature* e para cada máquina, então melhorar a ordenação da operação, balanceamento e otimização da linha [68].

Mesmo com todas as vantagens apresentadas pelo *software*, pelo estudo do uso do MLP, pode se perceber que o balanceamento é realizado sim utilizando a simulação de máquinas-ferramenta, porém este não realiza uma simulação do modelo *As Built* dos centros de usinagem utilizados na linha.

O *software* MLP utiliza um tempo aproximado para a realização do balanceamento, por considerar somente as velocidades e cursos do eixo, ou seja, realiza somente a simulação cinemática da máquina. Este é um ponto que faz com que o balanceamento não tenha a exatidão solicitada.

2.5.6.2 Plant Simulation

O *Tecnomatix® Plant Simulation®*, Figura 2.19, é uma ferramenta de simulação de eventos discretos que auxilia na criação de modelos digitais de sistemas logísticos, como por exemplo uma linha de produção, para que seja possível estudar as características dos sistemas simulados e otimizar o desempenho da produção [69].

O *software* auxilia principalmente na experimentação e execução da produção virtual, executa estudos de diversos cenários e hipóteses sem afetar os sistemas de produção existentes ou mesmo para a construção de uma nova linha no processo de planejamento da produção. Este *software* apresenta uma prévia de todo o sistema de produção, podendo realizar diversas propostas para estudo, antes que as linhas de produção sejam instaladas [70,69].

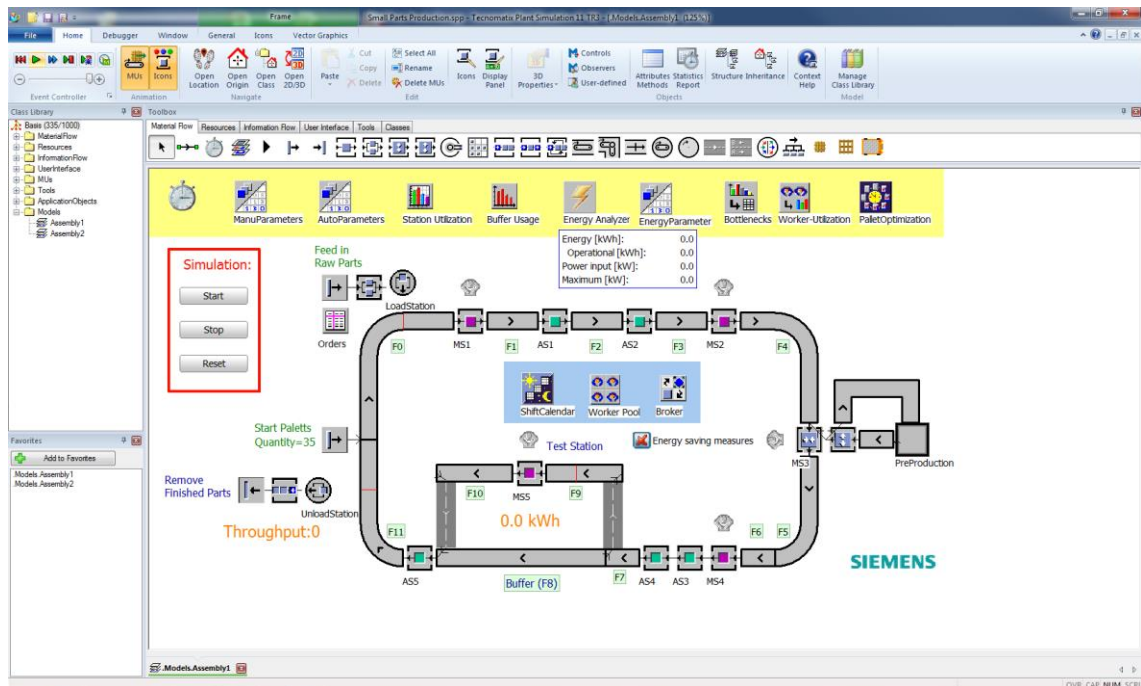


Figura 2.19: Área de trabalho do software Plant Simulation 11®

O *Plant Simulation*[®] dispõe de várias ferramentas para uma análise abrangente, como análise de problemas, estatísticas e gráficos permitindo uma avaliação dos diferentes cenários no processo de fabricação. Fornece informações necessárias para tomada de decisões rápidas e confiáveis mesmo nos estágios iniciais do planejamento da produção, mas também quando se é necessário a aquisição de novos equipamentos, expansão das linhas produtivas, entre outras, sem afetar os processos existentes. [70,69]

Com o *Plant Simulation*[®], é possível modelar e simular os sistemas de produção e seus processos. Podendo ser utilizado para realizar a otimização do fluxo de materiais e da utilização de recursos em diversos níveis de planejamento de fábrica a partir de instalações de produção, passando por fábricas locais até linhas específicas [69].

O *Plant Simulation*[®] pode sim auxiliar nesse trabalho, pois esse consegue simular toda a linha o mais próximo o possível do real, porém todos os dados de tempos de usinagem e tarefas devem ser inseridos manualmente. Portanto a utilização desse *software* em conjunto com a simulação de máquinas-ferramenta “*As Built*”, pode se alcançar tempo de usinagem mais exatos. Deste modo, pode-se realizar uma simulação com o *Plant Simulation*[®] e extrair resultados com maior exatidão.

3 Objetivos e Método de Trabalho

3.1 Objetivo Geral

O objetivo desta dissertação é o desenvolvimento de um método para rebalanceamento de linhas de usinagem para multiprodutos com auxílio da simulação efetiva do Programa NC de máquinas-ferramenta.

3.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos devem ser atendidos:

- Desenvolvimento de um método para o rebalanceamento de uma linha seriada de usinagem, para a fabricação de um ou mais diferentes produtos na mesma linha, com diferentes operações e ferramentas em cada centro de usinagem;
- Construção das simulações dos centros de usinagem da linha de produção. Esses modelos devem considerar a cinemática e o desempenho dinâmico do centro de usinagem real, ou seja, modelos “*As Built*”.
- Aplicação e validação do método de balanceamento de linha desenvolvido, em uma linha de usinagem de uma empresa fabricante de bloco de motores automotivos.

3.3 Desenvolvimento do trabalho

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram consideradas as seguintes etapas conforme a Figura 3.1.

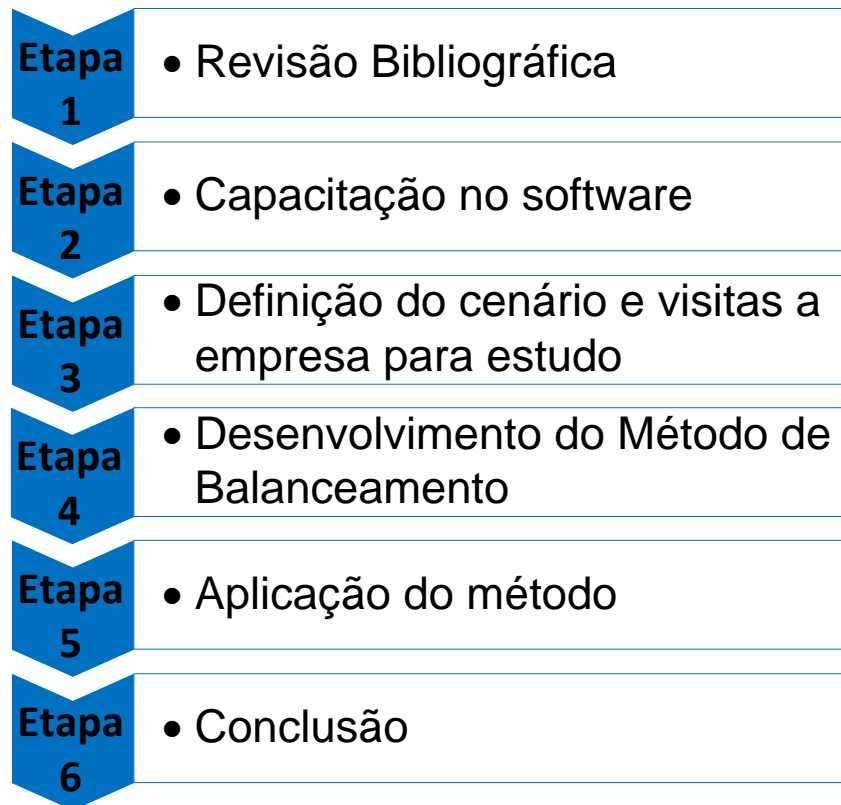


Figura 3.1: Etapas do trabalho

Em cada uma dessas etapas serão executadas as seguintes tarefas:

Etapa 1: Essa primeira etapa consiste na realização de uma ampla pesquisa em artigos científicos e livros, para um aprofundamento sobre o assunto e assim realizar a construção da revisão bibliográfica. A revisão foi realizada sobre os temas:

- Realização de uma ampla revisão bibliográfica sobre os temas relacionados:
 - Fábrica Digital;
 - Usinagem Multi-Eixos;
 - Parâmetros de Máquinas-Ferramenta
 - Balanceamento de Linha
 - Planejamento de Processo
 - Balanceamento de linha de produção

- Etapa 2: A segunda etapa consiste no aprendizado sobre os softwares para a construção de modelos virtuais de simulação de máquinas-ferramenta, Tecnomatix® RealNC, e a compreensão para utilização do software de eventos discretos, Tecnomatix® Plant Simulation.
- Etapa 3: Nessa terceira etapa, com cooperação de uma empresa parceira do Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura (SCPM), escolher qual linha de usinagem simular. Também foram realizadas visitas a empresa parceira para aquisição de dados e verificação da produção para iniciar a construção dos modelos para simulação dos centros de usinagem completos, no software RealNC. A aquisição de dados realizada nessa terceira etapa foi referente a:
- Aprendizado das normas internas para definição de ordem de operações de usinagem;
 - Aquisição de dados para a realização das simulações das máquinas:
 - Parâmetros de máquinas-ferramentas (Dinâmicos e Cinemáticos);
 - Tempos de usinagem;
 - Verificação e validação dos modelos de máquinas recebidos.
 - Aquisição de dados para o balanceamento da linha e modelo de simulação do Plant Simulation completo da linha [71].
- Etapa 4: Esta etapa consiste na construção do método para o rebalanceamento de linha de usinagem, que leve em consideração também a produção de outros produtos nessa mesma linha, para a realocação das ferramentas.
- Etapa 5: Aplicação do método para a verificação de possíveis desbalanceamentos, na linha de usinagem da empresa. Como descrito no método, serão realizadas simulação dos novos tempos de usinagem, simulados no RealNC® e no Plant Simulation® para validação do rebalanceamento da linha de usinagem.

Etapa 6: Verificação dos resultados gerados pela aplicação do método e a conclusão sobre o trabalho, levando em consideração as contribuições e se foi encontrada alguma limitação durante a aplicação do método.

3.4 Ferramentas para o desenvolvimento do trabalho

Para a realização do trabalho necessitou-se de recursos de *hardware* e *software*, para a construção das simulações. Desta maneira, utilizou-se uma *Workstation* e, como já apresentado, o *software* Tecnomatix® RealNC® v.8.5.0.235 e o *software* Plant Simulation® v.11.

A Workstation foi cedida pelo Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura (SCPM), para o desenvolvimento da dissertação e construção da simulação, sendo que as especificações da máquina são:

- Modelo: Dell Mobile Precision M4700
- Processador: Intel Core i7-3840QM 3ª Geração 2.80 GHz
- Memória RAM: 32 GB DDR3 1866 MHz
- Placa de Vídeo: Nvidia Quadro K2000M
- Sistema Operacional: Windows 7 Professional 64 Bits.

O *software* Tecnomatix® RealNC® foi escolhido para a realização da simulação da máquina-ferramenta baseada na leitura do programa NC, pois é uma ferramenta para análise detalhada e otimização do processo de usinagem, com base no programa NC. Este *software* auxilia na verificação dos tempos de usinagem, trajetórias de ferramenta e erros na programação. Com isso, podem ser reduzidos ou eliminados os riscos de colisões entre ferramenta e peça ou dispositivos de fixação, além de auxiliar na redução com tempos de usinagem, por apresentar o tempo igual ao tempo real de usinagem.

Para a verificação a linha de produção por um todo foi utilizado o *Plant Simulation*® v.11. Este *software* é uma ferramenta de simulação de eventos discretos, que auxilia na criação de modelos digitais de sistemas logísticos, assim como uma linha de produção. O *software* consegue simular toda a linha com os tempos das tarefas o mais

próximo o possível do real, porém todos esses dados de tempos de usinagem e tarefas devem ser inseridos manualmente. Portanto a utilização desse *software* em conjunto com a simulação de máquinas-ferramenta “*As Built*”, pode se alcançar tempo de usinagem mais exatos. Deste modo, pode-se realizar uma simulação e verificação do balanceamento da linha para extrair resultados com maior exatidão.

Para ambas as aplicações alguns outros softwares mostram diferentes alternativas no mercado, mas escolha dos *softwares*, *Plant Simulation*® v.11 e o Tecnomatix® RealNC®, foi por conta de serem os *softwares* que supriam a necessidade para a execução do estudo e também ambos já eram utilizados pela empresa a ser estudada.

4 Método de balanceamento de linha de usinagem

O planejamento de uma linha de produção convencional é, na maioria dos casos, baseado em grande parte de dados empíricos, no histórico documentado pela empresa e na experiência do engenheiro. Porém, quando a linha entra em produção, passa-se a ter os dados reais, que variam em relação aos valores empíricos iniciais.

Adicionalmente, com a linha já em funcionamento, as operações e programas NC recebem otimizações, que podem ser melhorias de ferramentas, de parâmetros de corte, novas ferramentas, entre outras, que geram otimizações locais e com isso um novo desbalanceamento da linha, devido a um ganho de tempo em uma determinada etapa da produção.

Com este desbalanceamento gerado aparece a oportunidade para um rebalanceamento, ou uma realocação, das operações de usinagem entre as máquinas-ferramenta, surgindo um potencial para o aumento da produtividade da linha, sem que seja necessária a aquisição de mais máquinas para a linha de produção.

O método desenvolvido nesse trabalho para rebalanceamento de linhas de usinagem, visa realizar a otimização do balanceamento de linhas já existentes na empresa, nas quais não serão realizadas avaliações de movimentação, aquisição, ou retirada de máquinas, mas somente a transferência de ferramentas entre centros de usinagem de diferentes operações da linha. O método desenvolvido é representado por um fluxograma, o qual na Figura 4.1 é apresentado na íntegra, possibilitando uma visão geral.

O método, leva em consideração outros produtos na linha. A aplicação deste método não implicará o desbalanceamento da linha em relação aos outros produtos que passam por ela.

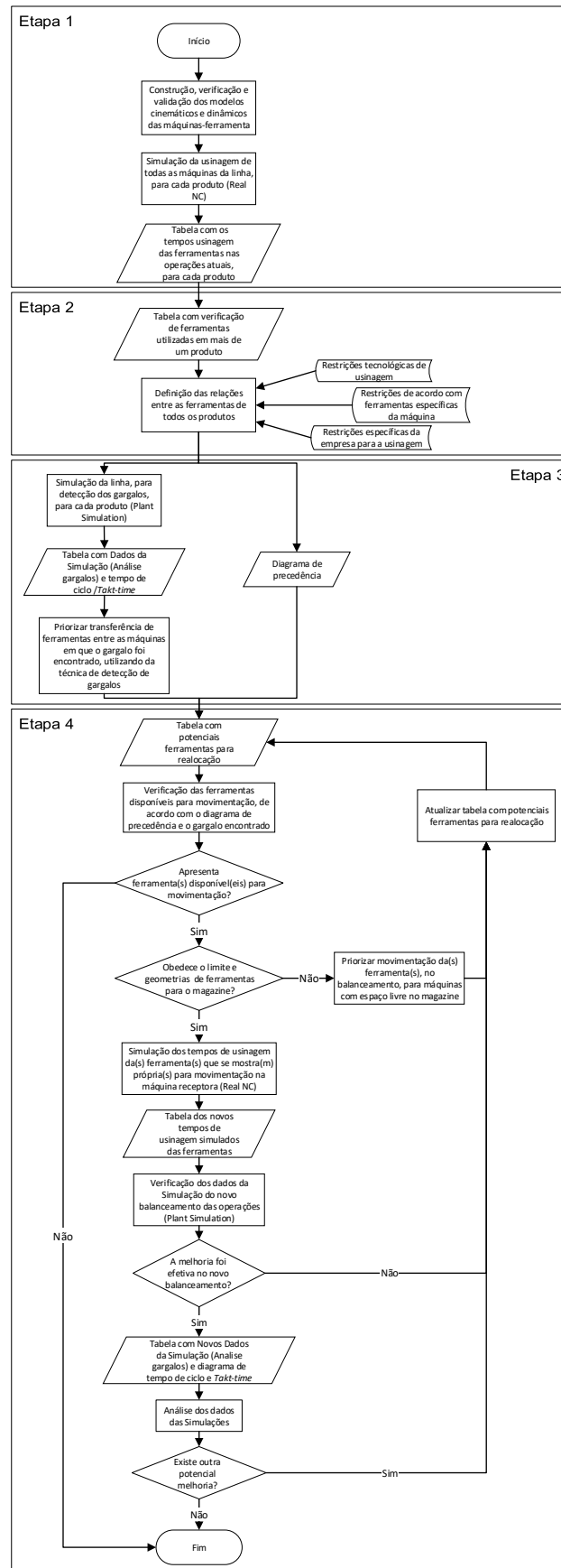


Figura 4.1: Fluxograma do método de rebalanceamento de linhas de usinagem

O método desenvolvido neste trabalho está apresentado, em partes, no fluxograma das Figura 4.2, Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5, mostrando as tarefas necessárias para a aplicação do método. O fluxograma, para facilitar a compreensão, foi dividido em quatro etapas principais, com suas sub-operações:

- Etapa 1 – Construção, simulação e documentação das máquinas-ferramenta e suas respectivas operações (Figura 4.2);
- Etapa 2 – Construção e documentação de uma tabela com as restrições e relações entre as ferramentas (Figura 4.3);
- Etapa 3 – Simulação e documentação da linha de produção em paralelo com a construção do diagrama de precedências das ferramentas (Figura 4.4);
- Etapa 4 – Verificação dos dados obtidos e balanceamento da linha, seguido da validação auxiliada pela simulação das máquinas e a simulação da linha (Figura 4.5).

4.1 Etapa 1 – Construção, simulação e documentação.

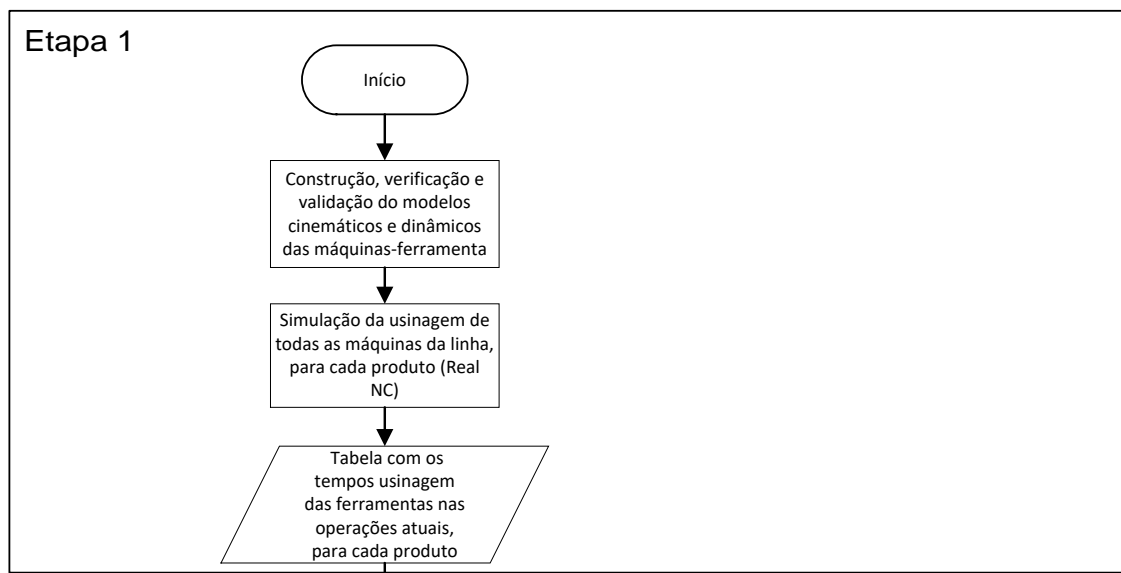


Figura 4.2: 1ª Parte do fluxograma do método de rebalanceamento de linhas de usinagem

A etapa 1 (Figura 4.2) para a implementação do método é relacionada à construção, simulação e documentação das máquinas-ferramenta e suas respectivas operações. Na primeira fase desta etapa do método, “Construção, verificação e validação dos

modelos cinemáticos e dinâmicos das máquinas-ferramenta”, é referente, assim como a descrição na tarefa já descreve, a construção, verificação e validação dos modelos cinemáticos e dinâmicos das máquinas-ferramenta, “*As Built*”. Para essa fase foi utilizado o *software* RealNC, no qual os arquivos dos modelos CAD das máquinas são importados, pois o software não conta com uma interface para a construção de um modelo geométrico complexo. O RealNC é utilizado para a definição da cinemática e dinâmica dos eixos, com os respectivos parâmetros, programas de inicialização da máquina, subprogramas e o programa NC, para que então seja realizada a verificação e validação desses modelos de acordo com os modelos reais das máquinas. Essa tarefa é realizada de acordo com o método para construção da simulação cinemática e dinâmica apresentado na Figura 2.5 (Seção 2.2).

A segunda fase da etapa 1, “Simulação da usinagem de todas as máquinas da linha, para cada produto (RealNC)”, é referente a simulação dos programas NC de cada operação de usinagem da linha. Essa tarefa deve ser realizada para todos os produtos que passam por essa mesma linha, pois cada produto tem seu programa de usinagem específico, com diferentes processos e com diferentes ferramentas para a manufatura. Portanto, para que seja verificado o tempo real de cada operação para cada produto, é necessário realizar a simulação de todos.

Para auxiliar a verificação dos tempos de usinagem, seja realizando movimentações em corte ou em vazio, com informações sobre os tipos de operações e movimentações realizadas, por cada ferramenta, é realizada a terceira fase da etapa 1 do método, “Tabela com os tempos usinagem das ferramentas nas operações atuais, para cada produto”. A terceira fase é referente a construção de uma tabela com todos os tempos de usinagem simulados das operações de usinagem atuais. Cada operação terá uma planilha, com os dados das operações realizadas, sendo que serão documentadas as informações das movimentações em corte, em vazio ou mesmo realizando alguma sub-rotina, com os respectivos tempos e informações auxiliares, como sentidos de rotação e faces usinadas, para cada um dos produtos da linha.

4.2 Etapa 2 – Restrições e relações entre as ferramentas

A etapa 2 do método (Figura 4.3), composta de duas fases, está concentrada na construção e documentação de uma tabela com as restrições e relações das ferramentas.

A primeira tarefa da etapa 2, "Tabela com verificação de ferramentas utilizadas em mais de um produto", utiliza a tabela criada da etapa anterior e possíveis planos de ferramentas que sejam disponibilizados pela empresa, para construir uma tabela com as ferramentas que são utilizadas em mais de um produto. Essa tarefa é necessária, pois em caso de somente a produção de um dos produtos necessitar de balanceamento, as ferramentas que são utilizadas em mais produtos não devem ser consideradas para movimentação, pois podem gerar o desbalanceamento da linha de produção de outro(s) produto(s).

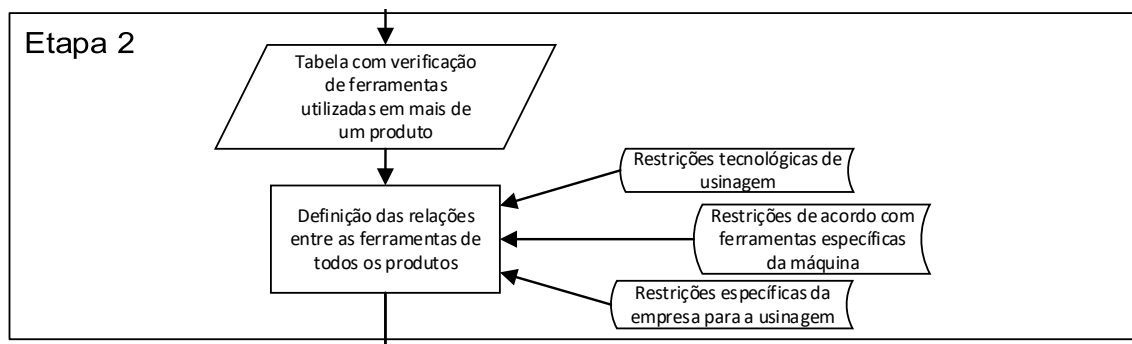


Figura 4.3: 2ª Parte do fluxograma do método de rebalanceamento de linhas de usinagem

A segunda fase da etapa 2, "Definição das relações entre as ferramentas de todos os produtos", assim como a descrição já diz, define as relações entre as ferramentas de todos os produtos. Esta fase leva em consideração as restrições tecnológicas de usinagem impostas pelo processo, as restrições específicas impostas pelas normas de usinagem da empresa e também as restrições de acordo com ferramentas específicas da máquina (ferramentas que somente podem ser utilizadas em uma máquina específica, por conta de limitações do dispositivo de fixação ou mesmo posições possíveis de giro da mesa).

4.3 Etapa 3 – Simulação da linha de produção e construção do diagrama de precedências das ferramentas

Na etapa 3 (Figura 4.4) será realizada toda a parte de simulação e documentação da linha de produção em paralelo com a construção do diagrama de precedências das ferramentas, onde essas tarefas devem ser concluídas para que seja iniciada a etapa 4.

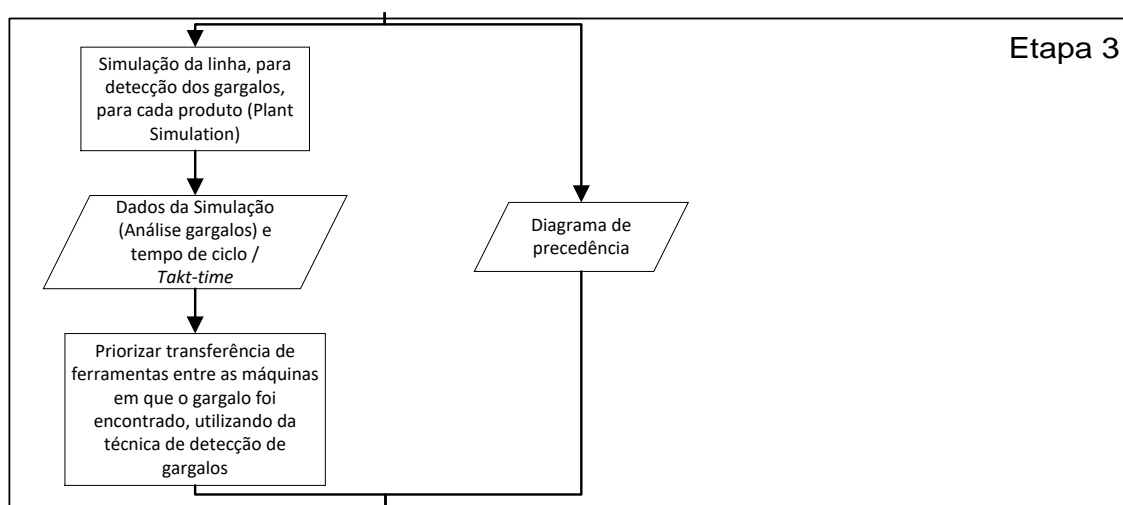


Figura 4.4: 3ª Parte do fluxograma do método de rebalanceamento de linhas de usinagem

A fase chamada “Diagrama de precedência” da etapa 3, é referente a construção do diagrama de precedências (ver Seção 2.5.5.1). Nessa etapa serão utilizadas as definições das relações entre ferramentas, geradas na etapa 2, para a construção de um diagrama para cada um dos produtos, contemplando todas as ferramentas da linha. Essas ferramentas poderão se inter-relacionar com base na tabela de ferramentas, da etapa anterior, utilizadas em mais de um produto. O diagrama auxiliará na verificação e decisão de qual ferramenta transferir entre centros de usinagem para o balanceamento.

Porém, o produto pode apresentar diversas faces usináveis e, em alguns casos, essas faces podem não ser acessíveis por limitações das diferentes máquinas, posicionamento do produto na mesa e dispositivos de fixação. Para auxiliar na verificação de quais faces são usinadas por cada ferramenta foram definidas, para as faces, diferentes cores. Portanto, para a construção do diagrama de precedência

foram adicionadas as cores referentes as faces em que cada uma das ferramentas realizarão a usinagem, podendo cada ferramenta receber mais de uma cor, se esta realizar a usinagem em mais de uma face, apresentando maior clareza e auxiliando na escolha das ferramentas para o balanceamento.

Paralelamente a fase “diagrama de precedência” será realizada a fase de “Simulação da linha, para detecção dos gargalos, para cada produto (Plant Simulation)” da etapa 3. Essa fase consiste em realizar a simulação da linha utilizando o *software* Plant Simulation, necessária para a detecção das operações gargalos para cada produto. Nessa fase serão utilizados os tempos das simulações das máquinas-ferramenta (RealNC) como sendo os tempos das operações de usinagem na linha, para a verificação dos gargalos.

Na fase seguinte, “Tabela com Dados da Simulação (Análise gargalos) e tempo de ciclo e Takt-time”, será feita a construção de uma tabela de dados da simulação da linha. Essa tabela deverá contemplar as porcentagens de tempo de operação (ciclos específicos da operação) e de tempo de inatividade (bloqueio e espera) de cada máquina, que serão utilizados para análise comparativa do ganho com o rebalanceamento.

A última atividade paralela dessa fase, “Priorizar transferência de ferramentas entre as máquinas em que o gargalo foi encontrado, utilizando da técnica de detecção de gargalos”, realiza a decisão de quais máquinas serão priorizadas para a transferência de ferramentas, buscando o rebalanceamento da linha. Deverá ser priorizada a máquina que mostre, segundo o método de *turning point* (Seção 2.5.4.2), o maior gargalo pelos pontos de giro localizados, ou pelo método de seta (Seção 2.5.4.1), o qual mostrará o maior gargalo pelo índice de bloqueio e espera, e pelo cálculo de severidade do gargalo. Os dois métodos para detecção de gargalos foram selecionados pelas suas funções, dependendo dos gargalos encontrados na simulação, estes definirão qual é o maior gargalo.

4.4 Etapa 4 – Análise dos gargalos, balanceamento da linha e validação auxiliada pela simulação.

A etapa 4 (Figura 4.5) é referente a toda a parte de análise, decisão e validação auxiliada pelas simulações do rebalanceamento da linha de usinagem. Na primeira fase da etapa 4, “Tabela com potenciais ferramentas para realocação”, será feita a identificação das ferramentas potenciais disponíveis para realocação e construção de uma tabela para a documentação destas ferramentas, levando em consideração as definições anteriormente estabelecidas na etapa 2, fase “Definição das relações entre as ferramentas de todos os produtos”.

Na próxima fase, “Verificação das ferramentas disponíveis para movimentação, de acordo com o diagrama de precedência e o gargalo encontrado”, é verificado o diagrama de precedência para definição de quais ferramentas podem realmente ser realocadas sem desrespeitar as precedências de operações. Feita a escolha das ferramentas que respeitam as precedências, é analisada a simulação do Plant Simulation e a definição do gargalo, para a verificação de quais ferramentas disponíveis para a movimentação poderão ser realocadas entre as máquinas definidas como gargalo de bloqueio e espera.

Pode existir também o caso onde os gargalos definidos não apresentarem ferramentas disponíveis para a realocação, portanto é necessária a validação pela pergunta, “Apresenta ferramenta(s) disponível(eis) para movimentação?”, se “Sim”, o método segue para a próxima fase da etapa 4, se “Não” o método é finalizado.

Seguindo com a etapa, onde foram encontradas uma ou mais ferramentas possíveis para realocação entre as máquinas definidas como gargalos, a próxima fase da etapa realiza mais uma verificação, “Obedece o limite e geometrias de ferramentas para o magazine? ”, portanto a ferramenta deve ainda obedecer às restrições de limites de quantidade e geometrias de ferramentas permitidas no magazine da máquina receptora, para seguir o método.

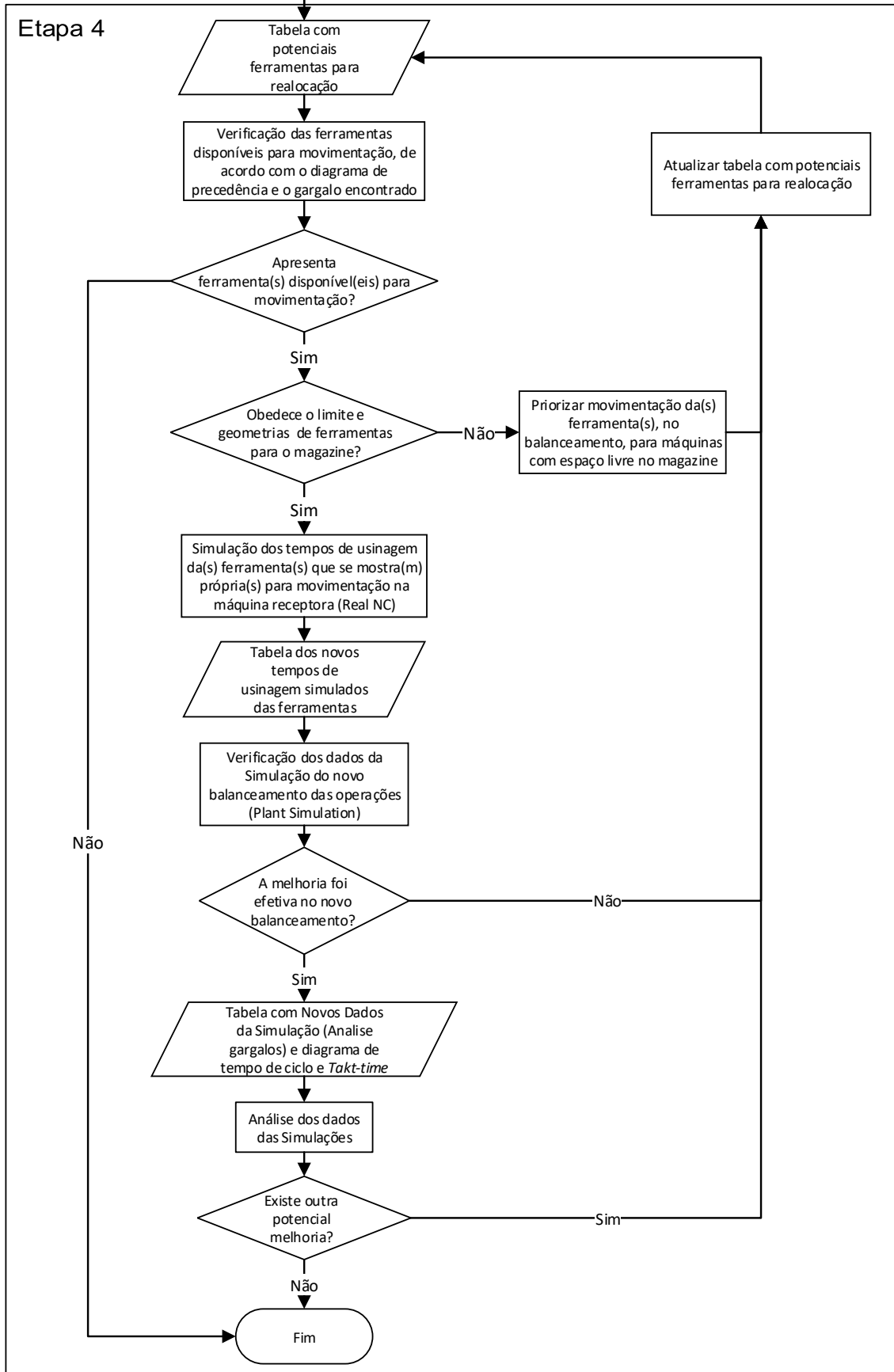


Figura 4.5: 3ª Parte do fluxograma do método de rebalanceamento de linhas de usinagem

Realizada a verificação e se a ferramenta não respeitar as restrições para o magazine, é realizada a fase de “Priorizar movimentação da(s) ferramenta(s), no balanceamento, para máquinas com espaço livre no magazine”, onde será selecionada outra alternativa de máquina que tenha espaço necessário no magazine ou possa receber o tipo específico de geometria da ferramenta e também seja uma máquina gargalo.

Para que possa ficar documentada que esta ferramenta não respeita as geometrias, a fase “Atualizar tabela com potenciais ferramentas para realocação” contempla atualização da tabela com potenciais ferramentas com as novas informações de restrição e é verificada outra ferramenta para movimentação. Esse ciclo se repete até que seja encontrada a possibilidade de uma movimentação, ou se não tiver nenhuma outra ferramenta disponível, o rebalanceamento é finalizado quando nenhuma possibilidade de mudança de ferramentas é observada. A fase “Simulação dos tempos de usinagem da(s) ferramenta(s) que se mostra(m) própria(s) para movimentação na máquina receptora (RealNC)” da etapa 4, realiza a simulação da ferramenta escolhida para o balanceamento no *software* RealNC utilizando o modelo virtual da máquina-ferramenta receptora. Por ser uma máquina diferente, é necessário verificar as possíveis alterações de tempo de processo de usinagem, os parâmetros dos eixos, elementos de fixação e a orientação da peça que poderão ser diferentes e conseqüente conduzirão alterações no tempo da operação da ferramenta.

Com os novos tempos da ferramenta simulada na máquina receptora a próxima fase, “Tabela dos novos tempos de usinagem simulados das ferramentas”, realizará a construção de uma nova tabela para documentação dos novos tempos de usinagem simulados da ferramenta realocada.

Com a nova ferramenta retirada da operação doadora, gargalo de bloqueio, está terá uma redução no seu tempo de ciclo, assim como a máquina receptora terá um aumento no seu tempo de ciclo, com a realocação, fazendo com que o tempo de ciclo da linha seja modificado.

A fase seguinte, “Verificação dos dados da Simulação do novo balanceamento das operações (Plant Simulation)”, utiliza os novos tempos de ciclo das operações modificadas como dado de entrada na simulação da linha no *software* Plant

Simulation. Com isso, pode-se verificar se a melhoria foi realmente efetiva para a redução ou eliminação do gargalo.

A próxima fase é uma decisão a partir dos dados do Plant Simulation, “A melhoria foi efetiva no novo balanceamento?”. Se esta modificação não trazer uma melhoria efetiva, no ponto de vista do engenheiro, é necessário realizar a atualização da tabela com potenciais ferramentas com as novas informações de restrição e, em seguida, verificar outra ferramenta para movimentação que possa gerar melhoria, e retomar os passos de verificação e simulação da ferramenta escolhida. Esse ciclo se repete até que seja encontrada a ferramenta que gere uma melhoria efetiva para o balanceamento. No caso de não encontrar uma melhoria efetiva o rebalanceamento é finalizado sem nenhuma possibilidade de mudança de ferramentas.

Se a melhoria for efetiva segue para a próxima fase, a qual é referente a atualização da “Tabela com novos dados da simulação (análise de gargalos) e diagrama de tempo de ciclo e Takt-time”. Nesta tabela serão atualizados os dados da simulação do Plant Simulation, com o novo balanceamento, então é verificada a equalização do novo tempo de ciclo geral com os tempos de ciclo das operações.

Concluída a atualização da tabela com os dados dos resultados da simulação a próxima fase trata da “Análise dos dados das Simulações”. Com os resultados do novo rebalanceamento da linha, é possível analisar os dados para verificar se ainda existem pontos de gargalos e se existe alguma outra possível mudança que se mostra como potencial melhoria.

Em seguida é realizada mais uma fase de decisão “Existe outra potencial melhoria?”. Com base nos dados analisados na fase anterior, dizer se existe ou não mais alguma melhoria potencial para ser estudada. Se verificar que existe outra melhoria potencial, retornar a etapa de atualização da tabela com potenciais ferramentas para realocação, para novamente realizar todas as etapas de verificação, simulação e validação do rebalanceamento.

No caso de não ser detectada outra melhoria potencial é finalizado o processo de otimização do balanceamento de acordo com o método construído.

5 Aplicação e Verificação do Método

Neste capítulo será apresentada a aplicação do método proposto em um estudo de caso em uma empresa fabricante de bloco de motores com o intuito de validá-lo.

Para aplicação do método será utilizada a linha de usinagem do bloco do motor 1.0l 3 cilindros. Essa linha realiza a usinagem de 4 modelos de blocos de motor:

- Bloco do motor 1.0l MPI 3 Cilindros;
- Bloco do motor 1.0l TSI 3 Cilindros;
- Bloco do motor 1.4l MPI 4 Cilindros;
- Bloco do motor 1.6l MPI 4 Cilindros.

A linha é composta de uma série de operações de usinagem, as operações 10, 20, 30 e 80. Assim como mostra a Tabela 5.1, a linha de usinagem apresenta uma quantidade diferente de máquinas por operação e cada operação também tem uma quantidade específica de ferramentas para cada produto.

Tabela 5.1: Dados referentes às máquinas e produtos da linha

Operações		Linha de Usinagem Bloco do Motor															
		OP10				OP20				OP30				OP80			
Máquinas	Quantidade	4				6				6				3			
	Eixos	5				4				4				4			
		Lineares: X/Y/Z Rotativos: A/B				Lineares: X/Y/Z Rotativos: A				Lineares: X/Y/Z Rotativos: A				Lineares: X/Y/Z Rotativos: A			
Fusos	2				2				2				2				
Ferramentas	Motor	1.0 MPI	1.0 TSI	1.4 MPI	1.6 MPI	1.0 MPI	1.0 TSI	1.4 MPI	1.6 MPI	1.0 MPI	1.0 TSI	1.4 MPI	1.6 MPI	1.0 MPI	1.0 TSI	1.4 MPI	1.6 MPI
	Quantidade	17	17	15	15	17	23	20	22	24	25	26	25	3	3	3	3

Na etapa referente à simulação das máquinas da linha foi definida uma máquina de cada uma das operações, pois dentro de cada operação as máquinas são iguais. Pode existir alguma pequena diferença no *Jerk* e *Kv*, porém os ganhos são os mesmos, já que as máquinas dentro de uma mesma operação têm a mesmo modelo, portanto a mesma arquitetura. O que não ocorre entre as operações, pois cada uma das operações tem diferentes máquinas, com diferentes arquitetura e parâmetros dos eixos.

Para a aplicação do método, todos os produtos foram levados em consideração, porém o foco de rebalanceamento foi somente o processo de usinagem do bloco do motor 1.0l MPI 3 Cilindros. O 1.0l MPI foi escolhido a pedido da empresa e também por ser o produto da linha ao qual foi liberado o acesso às informações necessárias para a realização do rebalanceamento. Parte das informações foram fornecidas, porém os programas NC e os tempos de usinagem referentes aos outros produtos, que são essenciais para a execução do método, não puderam ser compartilhados.

5.1 Especificações do processo

A linha de produção para o bloco do motor 1.0l MPI 3 Cilindros alcança a produção de 2000 blocos de motor, em 3 turnos de 7 horas e 20 minutos.

O bloco do motor é um produto que envolve diversos processos produtivos, como faceamento, furação, alargamento de furos, roscamento, mandrilamento, entre outros, descritos do Anexo 1 ao Anexo 11, os quais se referem à documentação das simulações das operações. Tais processos são realizados nas 6 faces do bloco, (ver Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3).

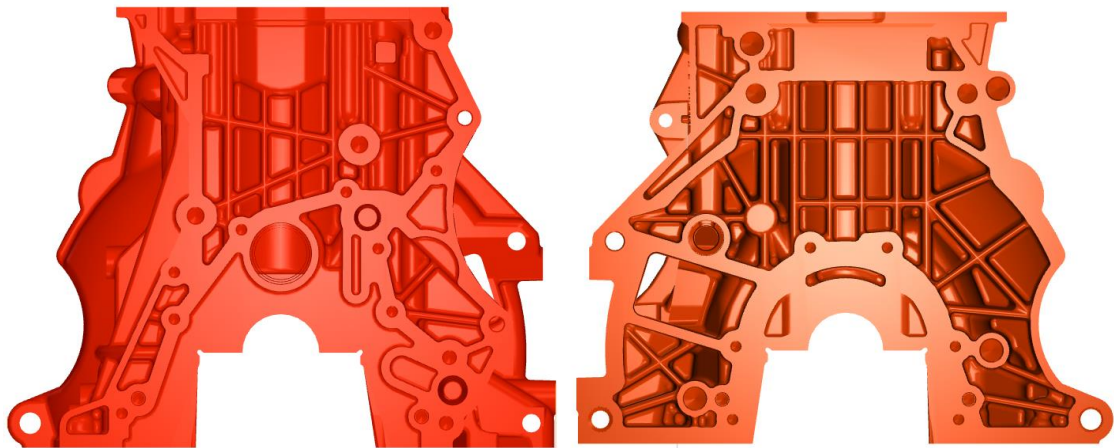


Figura 5.1: Faces do bloco do motor, esquerda "Polia" e direita "Câmbio"

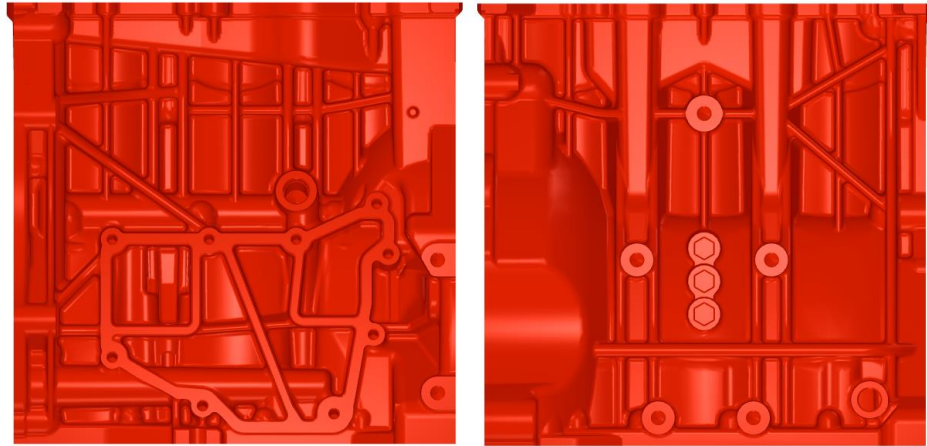


Figura 5.2: Faces do bloco do motor, esquerda "Blow-by" e direita "Selo"

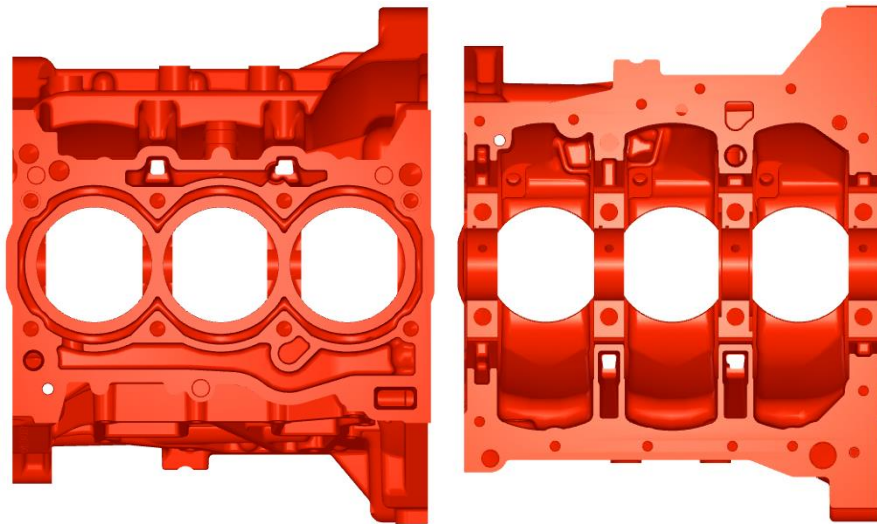


Figura 5.3: Faces do bloco do motor, esquerda "Cabeçote" e direita "Carter"

Para a usinagem do produto, cada máquina-ferramenta tem suas limitações. As limitações relacionam-se a:

- Posicionamento do bloco na mesa;
- Eixos lineares e rotativos na máquina;
- Dispositivo de fixação;
- Quantidade de ferramentas no magazine.

5.2 Aplicação do Método

O primeiro passo do método (Etapa 1 - Figura 4.2) é referente à construção da simulação das máquinas-ferramenta. A construção das máquinas das operações 10, 20, 30 e 80 (Figura 5.4) foram realizadas seguindo o fluxograma para construção da simulação cinemática dinâmica de máquina-ferramenta (Figura 2.5). Para a aquisição de dados, foram realizadas algumas visitas a empresa, a fim de obter os arquivos necessários para a construção das simulações e tabelas, assim como para o esclarecimento de dúvidas sobre a linha de produção.

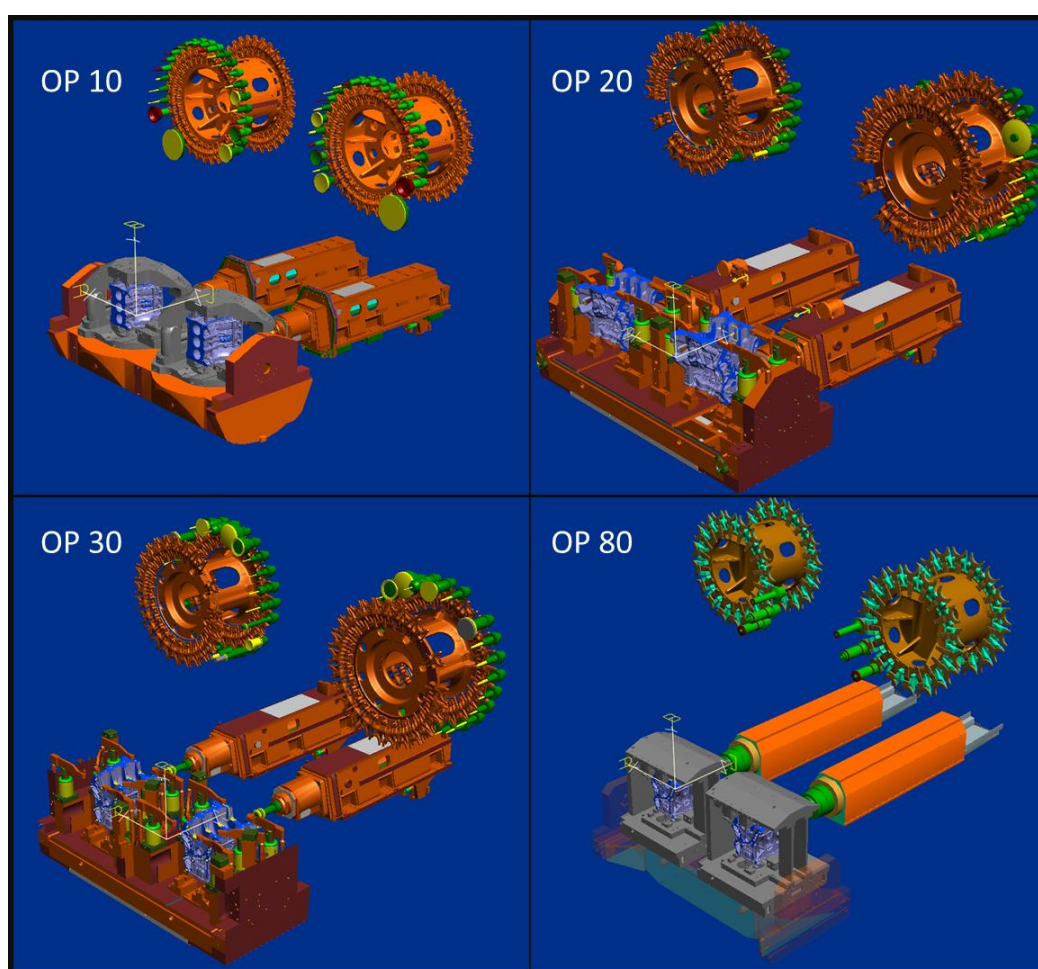


Figura 5.4: Modelos das máquinas das operações prontos para simulação.

Para a realização das simulações foi possível ter o acesso somente aos programas NC e tempos de usinagem do bloco 1.0l MPI 3 Cilindros (cyl). Por esse motivo, foram documentados somente os processos executados para a usinagem do bloco 1.0l MPI 3 Cilindros.

Para a documentação dos tempos de usinagem simulados, optou-se por utilizar o *software* Microsoft® Excel 2013. No *software* foram construídas as planilhas com todas as movimentações para cada operação de usinagem. Nessas planilhas foram documentadas as ferramentas, as respectivas operações e movimentações, e os tempos de usinagem para cada movimentação da máquina (parcial e total). A Figura 5.5 exemplifica como são as tabelas com a documentação, no entanto, a documentação detalhada do processo original se encontra nos Anexo 1 a Anexo 11.

OP 30		Bloco do Motor - 3 Cilindros				
Ferramenta	Operação	Especificação	Tempo de Troca de ferramenta [s]	Tempo de Operação (Em Vazio e em Corte) [s]	Tempo Acumulado [s]	Lado do bloco
	Troca	Inserir Primeira Ferramenta	2,696		2,696	
B3001	Posicionamento inicial	+ rotação da mesa A		1,648	4,344	Polia
B3001	Posicionamento	Alinhamento para aproximação G0		0,28	4,624	
B3001	Aproximação	Aproximação em G0		0,584	5,208	
B3001	Face 2F20	Faceamento abaixo		0,68	5,888	
B3001	Recuo	Retorno em G0		0,24	6,128	
B3001	Posicionamento	Alinhamento para aproximação G0		0,076	6,204	
B3001	Aproximação	Aproximação em G0		0,252	6,456	
B3001	Face 2F20	Faceamento acima		0,66	7,116	
B3001	Posicionamento	Alinhamento para Retorno G0		0,264	7,38	
B3001	Recuo	Retorno em G0		0,336	7,716	
B3001	Acabado	Tempo total da Operação B3001	2,696	5,02	7,716	
	Troca de Ferramenta	B3001 para B3002	2,248		9,964	
B3002	Posicionamento inicial	+ rotação da mesa A		1,648	11,612	Câmbio
B3002	Aproximação	Aproximação em G0		0,596	12,208	
B3002	Furo 2B4A/B	Início da Furação		0,86	13,068	
B3002	Furo 2B4A/B	Furação e rebaixo		1,44	14,508	
B3002	Recuo	Retorno em G0		0,184	14,692	
B3002	Acabado	Tempo total da Operação B3002	2,248	4,728	14,692	
B3003	Troca de Ferramenta	B3002 para B3003	2,404		17,096	
B3003	Posicionamento inicial			0,952	18,048	Câmbio
B3003	Posicionamento	Aproximação a partir da troca em G0		0,656	18,704	
B3003	Furo 2B5A/B	Início da Furação		2,004	20,708	
B3003	Furo 2B5A/B	Furação e rebaixo Mudança do Feed		1,22	21,928	
B3003	Recuo	Retorno em G0		0,184	22,112	
B3003	Acabado	Tempo total da Operação B3003	2,404	5,016	22,112	
	Troca de Ferramenta	B3003 para B3004	2,424		24,536	
B3004	Posicionamento inicial			0,952	25,488	Câmbio
B3004	Posicionamento	Alinhamento com o furo G0		0,612	26,1	
B3004	Furo 2B43	Início da Furação		0,94	27,04	
B3004	Furo 2B43	Furação e rebaixo com mudança do Feed		1,236	28,276	
B3004	Recuo	Retorno em G0		0,164	28,44	
B3004	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,468	28,908	
B3004	Furo 2B41	Início da Furação		0,94	29,848	
B3004	Furo 2B41	Furação e rebaixo com mudança do Feed		1,236	31,084	
B3004	Recuo	Retorno em G0		0,164	31,248	
B3004	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,472	31,72	
B3004	Furo 2B42	Início da Furação		0,94	32,66	
B3004	Furo 2B42	Furação e rebaixo com mudança do Feed		1,236	33,896	
B3004	Recuo	Retorno em G0		0,164	34,06	
B3004	Acabado	Tempo total da Operação B3004	2,424	9,524	34,06	
	Troca de Ferramenta	B3004 para B3006	2,384		36,444	
B3006	Posicionamento inicial			0,952	37,396	Câmbio
B3006	Posicionamento	Alinhamento com o furo G0		0,68	38,076	
B3006	Furo 2B20A	Furação e Chanfro		0,5	38,576	
B3006	Recuo	Retorno em G0		0,116	38,692	
B3006	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,492	39,184	
B3006	Furo 2B21A	Furação e Chanfro		0,5	39,684	
B3006	Recuo	Retorno em G0, para rotação da mesa		0,576	40,26	
B3006	Movimentação	Rotação da mesa A		1,648	41,908	Polia
B3006	Posicionamento	Alinhamento com o furo G0		0,62	42,528	
B3006	Furo 3B138A	Furação e Chanfro		0,528	43,056	
B3006	Recuo	Retorno em G0		0,104	43,16	

Figura 5.5: Tabela Op10 com informações da usinagem (Exemplo)

Para a primeira tarefa da Etapa 2 (Figura 4.4), referente ao método, elaborou-se a Tabela 5.2, que apresenta as ferramentas passíveis de utilização em mais de um produto e que será utilizada para as próximas etapas no auxílio do rebalanceamento da linha. Porém, durante a construção da tabela pode-se perceber que existem poucas ferramentas exclusivas para um único produto.

Tabela 5.2: Ferramentas utilizadas em mais de um produto

Linha de Usinagem Bloco do Motor																							
Ferramentas	Motor	1.0	1.0	1.4	1.6		1.0	1.0	1.4	1.6		1.0	1.0	1.4	1.6		1.0	1.0	1.4	1.6			
		MPI	TSI	MPI	MPI		MPI	TSI	MPI	MPI		MPI	TSI	MPI	MPI		MPI	TSI	MPI	MPI			
		3cyl	3cyl	4cyl	4cyl		3cyl	3cyl	4cyl	4cyl		3cyl	3cyl	4cyl	4cyl		3cyl	3cyl	4cyl	4cyl			
	B1001	x	x	x	x		B2001	x	x	x	x		B3001	x	x	x	x		B8001	x	x	x	
	B1002			x	x		B2002	x	x	x	x		B3002	x	x	x	x		B8002				x
	B1003	x	x				B2003	x	x	x	x		B3003	x	x	x	x		B8003	x	x	x	
	B1004	x	x	x	x		B2004	x	x	x	x		B3004	x	x	x	x		B8004				x
	B1005	x	x	x	x		B2005	x		x			B3005		x	x	x		B8005	x	x		
	B1009	x	x	x	x		B2006		x		x		B3006	x	x	x	x		B8006			x	
	B1011	x	x	x	x		B2007	x	x	x	x		B3007	x	x	x	x		B8007				x
	B1012	x	x				B2009			x	x		B3008	x	x	x	x		Total	3	3	3	3
	B1013	x	x	x	x		B2010			x	x		B3009	x	x	x	x						
	B1014	x	x	x	x		B2011			x	x		B3010	x	x	x	x						
	B1015	x	x	x	x		B2012			x	x		B3011	x	x	x	x						
	B1016	x	x	x	x		B2013	x	x	x	x		B3012	x	x	x	x						
	B1017	x	x	x	x		B2014	x	x	x	x		B3013	x	x	x	x						
	B1019	x	x	x	x		B2015	x	x	x	x		B3014	x	x	x	x						
	B1020	x	x	x	x		B2016	x	x		x		B3015	x	x	x	x						
	B1021	x	x				B2017	x	x	x	x		B3016	x									
	B1036	x	x	x	x		B2018	x	x	x	x		B3017		x	x							
	B1037	x	x	x	x		B2019	x	x	x	x		B3018				x						
	Total	17	17	15	15		B2020	x	x	x	x		B3019	x	x	x	x						
							B2021	x	x	x	x		B3021	x	x	x	x						
							B2022	x	x	x	x		B3022	x	x	x	x						
							B2023	x	x	x	x		B3023	x	x	x	x						
							B2024				x		B3024	x	x	x	x						
							B2025		x				B3025	x	x	x	x						
							B2026		x				B3026	x	x	x	x						
							B2027		x				B3028	x	x	x	x						
							B2028		x				B3030	x	x	x	x						
							B2029		x				B3031			x							
							B2031		x				Total	24	25	26	25						
							Total	17	23	20	22												

No passo seguinte, da segunda etapa, foram definidas as restrições referentes ao uso das ferramentas da linha. As informações das relações de restrição tecnológica, específicas ou de máquinas, foram utilizadas para auxiliar na construção do diagrama de precedência e na verificação das ferramentas para movimentação. As definições das ferramentas foram descritas a partir das:

- Restrições tecnológicas de usinagem;
 - Sequência exemplo: fresamento de desbaste da face; fresamento de acabamento da face; furações; alargamento do furo; aprofundamento do furo; roscamento do furo; limpeza da face.
- Restrições específicas da empresa para a usinagem;
 - Para esta tarefa realizou-se uma visita à planta, para aprendizado das normas internas para definição de ordem de operações de usinagem.
- Restrições de acordo com ferramentas específicas da máquina;
 - Pelas áreas possíveis de serem usinadas (Tabela 5.3), variando de acordo com:
 - Dispositivo de fixação do bloco;
 - Eixos da máquina;
 - Posicionamento do bloco no dispositivo de fixação.
 - Geometria do *holder* (as máquinas dessa linha não possuem variação).

Tabela 5.3: Verificações de máquinas e as faces disponíveis para usinagem.

Operações		Linha de Usinagem Bloco do Motor			
		OP10	OP20	OP30	OP80
Máquinas	Eixos	5	4	4	4
		Lineares: X/Y/Z Rotativos: A/B	Lineares: X/Y/Z Rotativos: A	Lineares: X/Y/Z Rotativos: A	Lineares: X/Y/Z Rotativos: A
	Fusos	2	2	2	2
Faces utilizadas pelo dispositivo de fixação		Polia; Câmbio;	Carter (Braços de fixação); Cabeçote;	Carter (Braços de fixação); Cabeçote;	Carter; Cabeçote (Aberturas usinagem);
Faces aptas para usinagem		Carter; Cabeçote; Selo (Parcialmente)	Carter (Parcial); Selo; Blow-By	Carter (Parcial); Polia; Câmbio;	Polia; Câmbio; Cabeçote (Parcial);
Posicionamento do Bloco		Eixo B rotativo	Longitudinal	Transversal	Longitudinal

A Tabela 5.3 foi construída para auxiliar na verificação das áreas possíveis de serem usinadas. Essa tabela mostra a disposição do bloco na mesa da máquina e por quais faces é fixada na mesa pelo dispositivo de fixação. Além disso, identifica as faces que podem ser usinadas, sejam elas parcialmente ou totalmente livre de obstáculos para usinagem do bloco.

Seguindo o método, na terceira etapa, construiu-se o diagrama de precedência das ferramentas para cada operação. Para estes diagramas de precedência, foram

adicionadas algumas características, descritas a seguir, diferentes das usualmente utilizadas, para auxiliar na verificação das ferramentas possíveis para realocação nas outras máquinas da linha (Figura 5.6):

- Identificação por cores das faces usinadas por cada ferramenta (legenda de cores no Anexo 16);
- Identificação por hexágonos, e não pelos símbolos ovais, que representam uma ferramenta da operação atual, identifica uma ferramenta precedente de uma operação anterior.

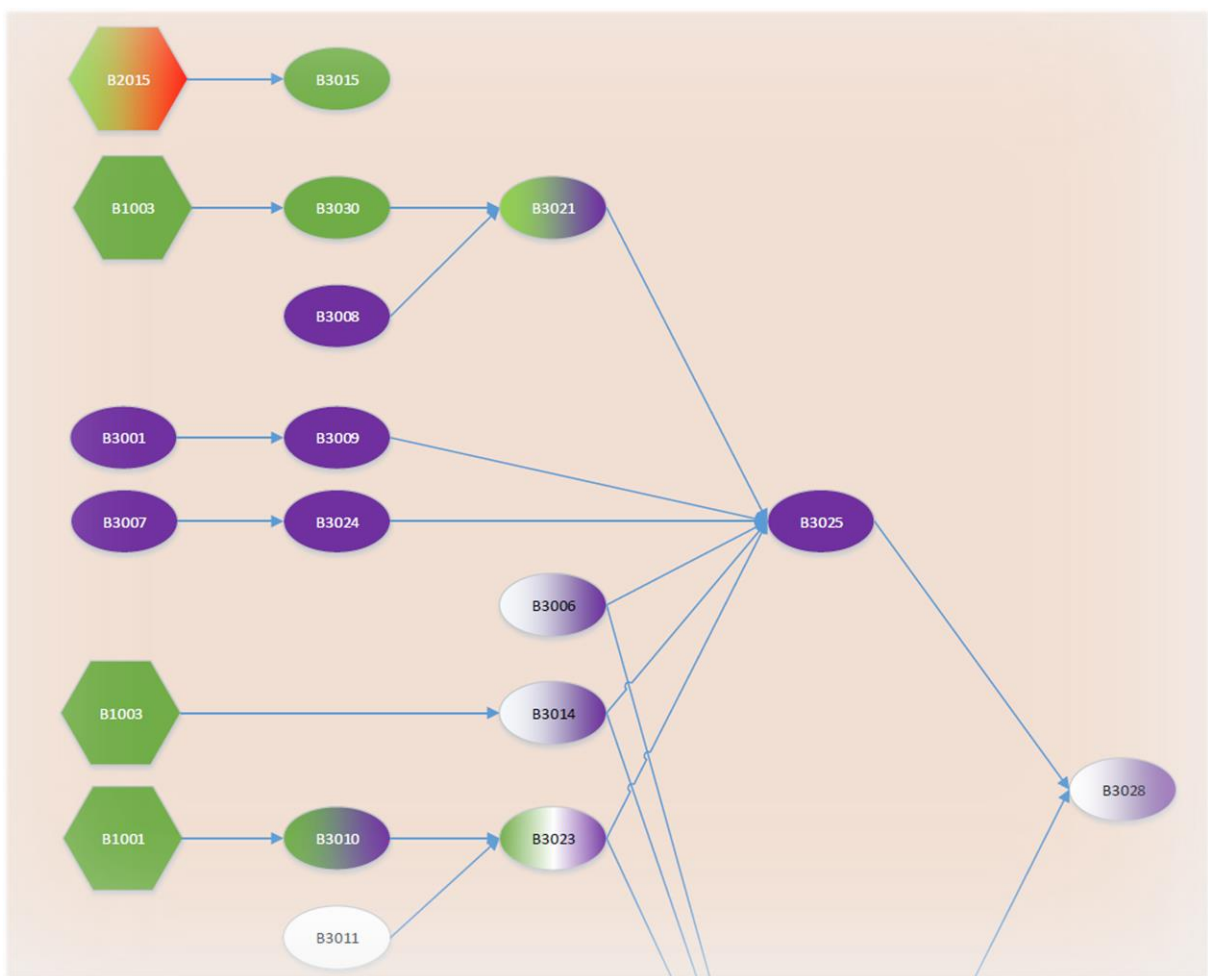


Figura 5.6: Parte de um dos diagramas de precedência, para digramas completos ver Anexo 12 a Anexo 15

Em paralelo à construção dos diagramas, simulou-se a linha no Plant Simulation. Para isto, os valores de tempo de usinagem para cada operação foram utilizados e previamente simulados no RealNC, cujos resultados estão apresentados na Tabela

5.4. Em virtude de os programas e tempos de usinagem não terem sido disponibilizados para realização das análises e simulações para outros produtos da mesma linha de produção, somente a produção do 1.0 MPI 3 cyl foi simulada.

Para a simulação da linha, foi considerado um dia de trabalho para a produção do bloco 1.0 MPI 3 cyl. Este dia de trabalho é considerado pela empresa como 3 turnos de 7 horas e 20 minutos cada, totalizando 22 horas de trabalho, para produzir aproximadamente 2000 blocos de motor 1.0 MPI 3 cyl.

Tabela 5.4: Tempo resultante da simulação no RealNC para inserção nas máquinas do Plant Simulation e tempos de ciclo calculados para verificação prévia

OP	10	20	30	80
Máquinas	4	6	6	3
Blocos	2	2	2	2
Tempo da Operação [h:min:s]	00:03:11.88	00:03:44.08	00:05:30.94	00:02:07.64
Tempo da Operação [s]	191,88	224,08	330,944	127,64
Tempo de Ciclo [s]	23,985	18,673	27,579	21,273

Realizada a simulação, foram obtidos 2064 blocos de motor da OP80. A partir disso, é possível concluir que a linha tem um *Takt-Time* de 38.35s e, portanto, possui um tempo muito maior que o tempo de ciclo das operações, sendo isso decorrente de uma operação de inspeção que acontece logo após a usinagem. Esta operação de inspeção é realizada somente por uma máquina e com um tempo de ciclo muito maior que o das operações de usinagem, ocasionando um gargalo e a consequente redução da máxima demanda possível da linha completa, implicando também em um aumento no *Takt-Time*. Porém, esse gargalo não será levado em consideração na análise, uma vez que esta dissertação visa somente ao balanceamento para uma equalização dos tempos de usinagem.

Utilizando brevemente um gráfico comparativo em Excel (Figura 5.7) entre os tempos de ciclo das operações, percebe-se que o gargalo está localizado na OP 30 e a máquina com menor uso é a OP20. Para uma verificação mais exata do gargalo, no entanto, executou-se sua simulação na linha.

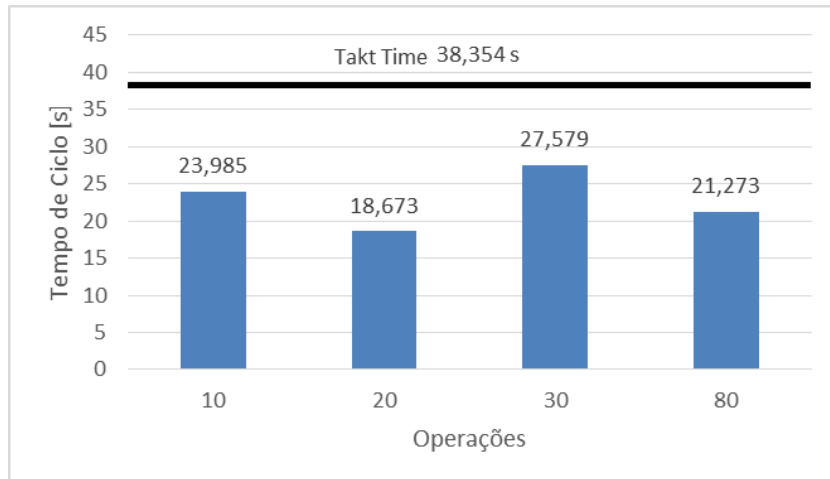


Figura 5.7: Gráfico Takt-Time x Tempo de Ciclo

A simulação no *Plant Simulation* apresenta os valores, em porcentagem, do tempo de funcionamento da máquina em relação aos tempos não produtivos (Figura 5.8). A simulação apresenta a porcentagem dos valores de máquina em processo (porção verde), bloqueio (porção amarela), espera (porção cinza) e máquina parada (troca de turno) (porção azul).

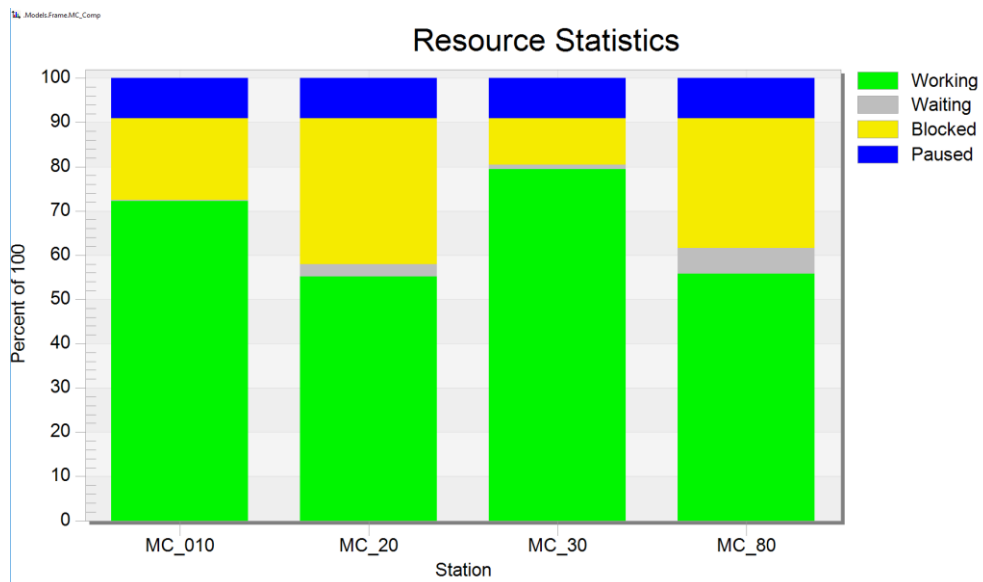


Figura 5.8: Gráfico com as estatísticas de recursos do estado atual em porcentagem, gerado pela simulação no *Plant Simulation*.

Porém, por existirem outras operações que não estão sendo analisadas entre as operações de usinagem, a verificação a partir dos tempos de bloqueio e espera não pode ser realizada, pois não apontaria para um resultado correto do gargalo, isto é,

seria uma análise incompleta. Por tal razão, verificou-se que as técnicas de detecção de gargalo analisadas não são funcionais para uma análise parcial dos processos da linha neste caso.

Pela análise das porcentagens de tempo de trabalho (Tabela 5.5), entre as operações, foi possível encontrar o gargalo na OP30, que possui uma porcentagem de tempo de trabalho de 79,32%. Analisando-se o menor percentual de tempo de trabalho, encontraram-se duas operações com valores próximos, a OP20 e a OP80, com 55,15% e 55,76%, respectivamente. Para essa primeira análise de rebalanceamento, selecionou-se a OP20, pois além de apresentar um menor valor percentual de tempo de trabalho, também apresenta mais opções de ferramentas para movimentação, conforme prévia verificação no diagrama de precedências (Ver Anexo 13 e Anexo 14).

Tabela 5.5: Tabela com as porcentagens atuais de trabalho das operações, pela simulação da linha no Plant Simulation.

Operação		10	20	30	80
Atual	Trabalhando [%]	72,28	55,15	79,32	55,76
	Esperando [%]	0,16	2,75	1,07	5,96
	Bloqueada [%]	18,47	33	10,51	29,18
	Pausada [%]	9,09	9,09	9,09	9,09

Na etapa 4 do método (Figura 4.5), realizou-se uma verificação para localizar as ferramentas possíveis de realocação. Primeiramente, é feita a verificação das ferramentas, com base nas tabelas de verificação de ferramentas utilizadas em mais de um produto e no diagrama de precedência (Anexo 13 e Anexo 14, respectivamente).

A partir desses dados, foi possível encontrar somente uma ferramenta que respeita as verificações (ferramenta B3016), possibilitando a transferência da OP30 para a OP10 ou OP20, como mostra a Tabela 5.6. Porém, quando a verificação das relações definidas sobre as restrições das ferramentas é realizada, de acordo com o dispositivo de fixação da máquina, a ferramenta demonstra não ser própria para movimentação para nenhuma das duas operações. Na OP10 a ferramenta é restringida pelo bloqueio do dispositivo de fixação na face; na OP 20, é restringida pelo posicionamento do

bloco no caiaque e por ter o limite de movimentação somente em 4 eixos, especificamente no centro de usinagem, que não possui o eixo de rotação B.

Tabela 5.6: Ferramenta verificada como a única específica do 1.0l MPI 3Cyl

		Específica do 1.0l MPI?	Ferramentas potenciais para realocação				
			Operação	10	20	30	80
Ferramenta	B3016	Sim	Respeita relações de precedência?	Sim	Sim	-	Não
			Respeita relações de restrições?	Não	Não	-	Sim

Para possibilitar o balanceamento desta linha e para validação do método, foram desconsideradas as verificações referentes aos outros produtos. Para um rebalanceamento válido, considerou-se a opção da duplicação das ferramentas disponíveis para o balanceamento dessa linha.

Seguindo com o método, uma nova tabela com as ferramentas possíveis para realocação foi construída (Tabela 5.7), que mostra as ferramentas verificadas. Muitas delas não são apresentadas na tabela, pois não respeitavam nenhuma das possibilidades para mudança.

Na OP30 foram encontradas 3 ferramentas com possibilidade de duplicação para as outras operações. As ferramentas que serão primeiramente consideradas são as ferramentas possíveis para a OP20, máquina com maior disponibilidade no momento de aplicação do método.

Para a simulação da movimentação das ferramentas foi necessário reescrever o programa NC, em função da diferença no posicionamento do bloco na nova máquina, porém obedecendo os desenhos dos planos de processo.

Com a simulação realizada, como já esperado, as ferramentas na nova máquina tiveram diferenças no tempo de usinagem. Na nova máquina, pela mudança dos eixos de movimentação do processo e diferença nos parâmetros de máquina, as duas ferramentas tiveram um ganho no tempo. A Figura 5.9 demonstra o gráfico para comparação entre os novos cenários do balanceamento e o atual, somente verificando

os tempos de ciclo das operações, calculado a partir dos novos tempos de usinagem das operações 20 e 30.

Tabela 5.7: Tabela de potenciais ferramentas para realocação da OP30

		Ferramentas potenciais para realocação				
		Operação	10	20	30	80
Ferramentas	B3015	Respeita relações de precedência?	Não	Sim	-	Não
		Respeita relações de restrições?	Não	Sim	-	Sim
	B3030	Respeita Diagrama de precedência?	Sim	Sim	-	Não
		Respeita relações de restrições?	Sim	Sim	-	Não
	B3001	Respeita Diagrama de precedência?	Sim	Sim	-	Não
		Respeita relações de restrições?	Não	Não	-	Sim
	B3007	Respeita Diagrama de precedência?	Sim	Sim	-	Não
		Respeita relações de restrições?	Não	Não	-	Sim
	B3028	Respeita Diagrama de precedência?	Não	Não	-	Sim
		Respeita relações de restrições?	Não	Não	-	Sim
	B3010	Respeita Diagrama de precedência?	Sim	Sim	-	Não
		Respeita relações de restrições?	Não	Não	-	Sim

A partir da análise do gráfico da Figura 5.9, já se pode perceber ganho no nivelamento dos novos cenários com a realocação das ferramentas. Analisando-se os cenários, com auxílio dos gráficos de tempo de ciclo da Figura 5.9 e com o balanceamento das operações, pela realocação das ferramentas B3015 e B3030, pode-se verificar ganhos em cada cenário, sendo este ganho com as ferramentas separadas ou juntas para a movimentação, ambas se aproximando de um melhor rebalanceamento. Para uma verificação mais exata do real ganho do rebalanceamento, o próximo passo é a simulação da linha no Plant Simulation com os novos tempos simulados no RealNC.

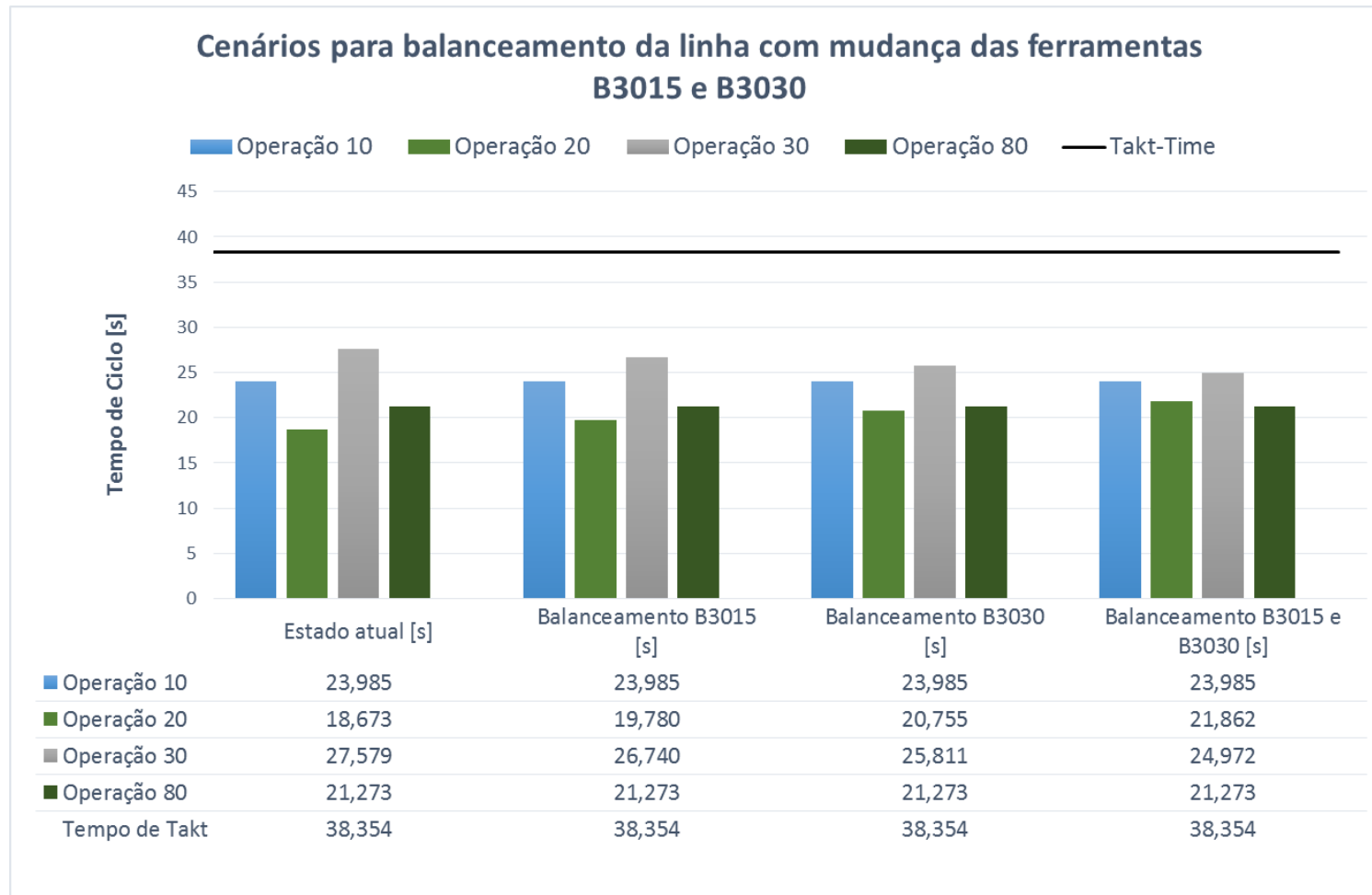


Figura 5.9: Gráfico com os tempos de ciclo dos diferentes cenários de balanceamento das operações e tabela com os respectivos valores

A Figura 5.10 apresenta o gráfico do primeiro cenário de rebalanceamento da linha. Comparando o gráfico do novo balanceamento com o do estado atual (Figura 5.8) da linha, nota-se um discreto ganho com a mudança da ferramenta B3015 da OP30 para a OP20.

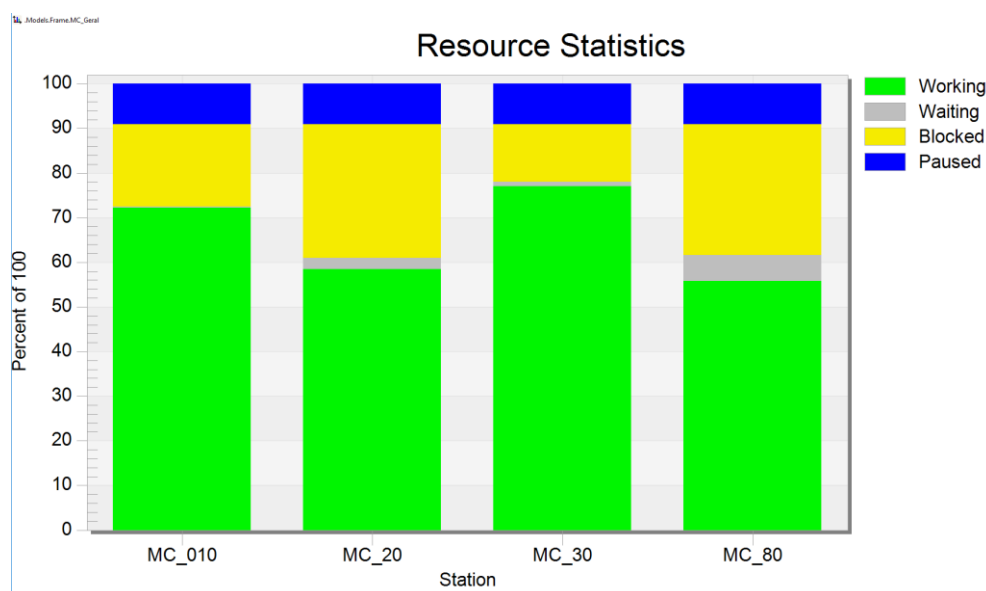


Figura 5.10: Gráfico com as estatísticas do balanceamento com a ferramenta B3015 em porcentagem, gerado pela simulação no Plant Simulation

A partir dos dados retirados das estatísticas de máquina no Plant Simulation (Tabela 5.8), em comparação com os valores do estado atual (Tabela 5.5), pode-se realizar uma análise mais detalhada. Tomando-se primeiramente a OP30, pode-se notar que esta apresentou uma redução de 2,34% no seu tempo em processo. Já a operação 20 teve um aumento de 3,29% do tempo em processo.

Tabela 5.8: Tabela com as porcentagens de trabalho das operações no balanceamento com a ferramenta B3015.

Operação		10	20	30	80
B3015	Trabalhando [%]	72,28	58,44	76,98	55,76
	Esperando [%]	0,16	2,59	1,06	5,96
	Bloqueada [%]	18,47	29,88	12,87	29,18
	Pausada [%]	9,09	9,09	9,09	9,09

Com a análise dos valores verificou-se que esse balanceamento possibilitaria alcançar a produção de aproximadamente 62 blocos de motor a mais por dia em comparação com o estado atual da linha, que produz 2064 blocos de motor por

dia. Portanto, nessa configuração a linha alcançaria aproximadamente 2126 blocos por dia.

A Figura 5.11 mostra o gráfico para o segundo cenário do rebalanceamento da linha. Comparando-se o gráfico do segundo cenário do rebalanceamento, pela mudança da ferramenta B3030, com o do estado atual da linha (Figura 5.8), pode-se perceber um ganho maior do que o ganho com a mudança da ferramenta B3015.

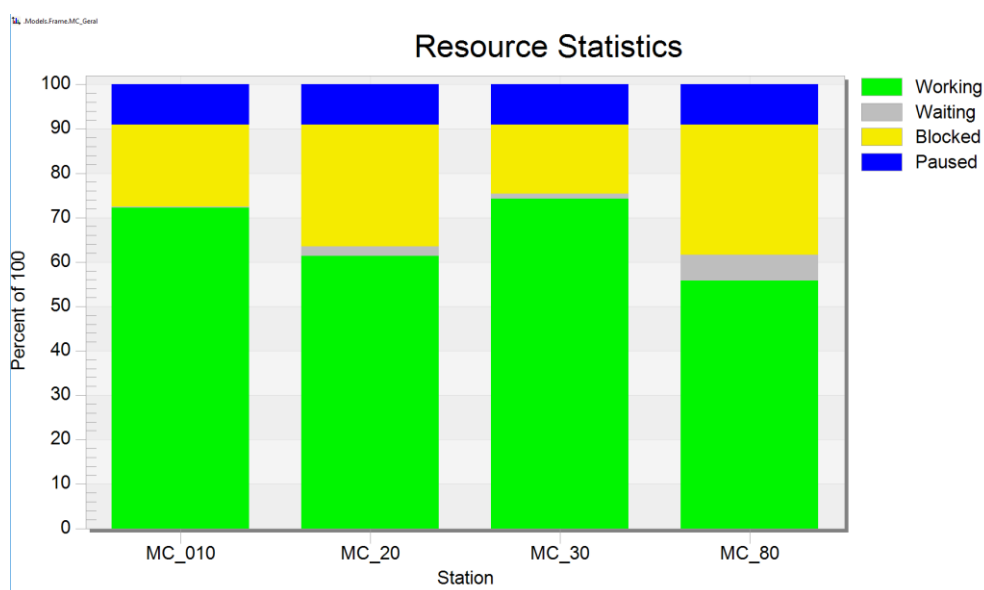


Figura 5.11: Gráfico com as estatísticas do balanceamento, com a ferramenta B3030, em porcentagem, gerado pela simulação no Plant Simulation

A partir dos dados retirados das estatísticas de máquina no Plant Simulation (Tabela 5.9), para a ferramenta B3030, em comparação com os valores do estado atual (Tabela 5.5), pode-se promover uma análise mais detalhada. Analisando a OP30, nota-se que esta apresentou uma redução de 5,02% no seu tempo em processo. Já a operação 20 teve um aumento de 6,17% do tempo em processo. Tais dados mostram um resultado melhor no rebalanceamento da linha em comparação com o resultado do balanceamento com a mudança da ferramenta B3015.

Tabela 5.9: Tabela com as porcentagens de trabalho das operações no balanceamento com a ferramenta B3030.

Operação		10	20	30	80
B3030	Trabalhando [%]	72,28	61,32	74,3	55,76
	Esperando [%]	0,16	2,14	1,07	5,96
	Bloqueada [%]	18,47	27,45	15,54	29,18
	Pausada [%]	9,09	9,09	9,09	9,09

A análise dos valores revelou que esse balanceamento possibilitaria alcançar a produção de aproximadamente 139 blocos de motor a mais por dia em comparação com o estado atual da linha, que produz 2064 blocos de motor por dia. Portanto nessa configuração a linha alcançaria a produção de aproximadamente 2203 blocos diários.

A Figura 5.12 apresenta o gráfico para o terceiro cenário do rebalanceamento da linha. Comparando-se o gráfico do cenário com a mudança simultânea das ferramentas B3015 e B3030 para o rebalanceamento com o gráfico do estado atual da linha (Figura 5.8), nota-se um ganho maior que o obtido pela mudança da ferramenta B3030.

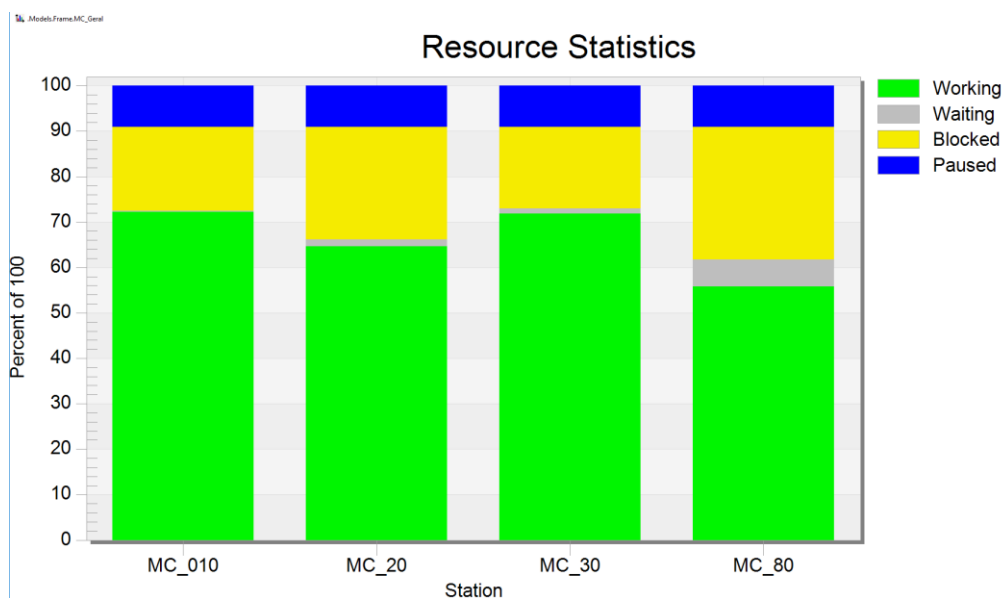


Figura 5.12: Gráfico com as estatísticas do balanceamento em porcentagem, com as ferramentas B3015 e B3030, gerado pela simulação no Plant Simulation

É possível obter uma análise mais detalhada com os dados retirados das estatísticas de máquina do terceiro cenário no Plant Simulation (Tabela 5.10),

para a mudança das ferramentas B3015 e B3030, em comparação com os valores do estado atual (Tabela 5.5). Analisando-se a OP30, observa-se uma redução de 7,43% no seu tempo em processo. Já a OP20 teve um aumento de 9,44% do tempo em processo. Este resultado mostrou a melhor possibilidade para o rebalanceamento da linha, em comparação com os outros cenários simulados.

Tabela 5.10: Tabela com as porcentagens de trabalho das operações no balanceamento com as ferramentas B3015 e B3030.

		Operação	10	20	30	80
B3015 + B3030	Trabalhando [%]		72,28	64,59	71,89	55,76
	Esperando [%]		0,16	1,6	1,09	5,96
	Bloqueada [%]		18,47	24,72	17,93	29,18
	Pausada [%]		9,09	9,09	9,09	9,09

A análise dos valores verifica que com esse balanceamento seria possível alcançar a produção de aproximadamente 201 blocos de motor a mais por dia em comparação com o estado atual da linha, que produz 2064 blocos de motor por dia. Nessa configuração, portanto, a linha alcançaria aproximadamente 2265 blocos por dia. Entretanto, deve-se ressaltar que nesse cenário houve modificação na operação que ditava o tempo de ciclo da linha, portanto o número de blocos de motor apresentados se refere ao tempo de ciclo da , OP10, agora gargalo.

Adiante, verificou-se resultado efetivo para o rebalanceamento da linha de usinagem, e os dados da simulação do Plant Simulation foram todos documentados. O passo seguinte é a análise dos dados documentados da simulação para a verificação da possibilidade de outra melhoria potencial, que, caso não exista, resulta na finalização do método.

Se outra potencial melhoria for identificada, é necessário atualizar da tabela com as potenciais ferramentas para realocação e realizar todo o processo de verificação definido pelo método, para assim analisar outras propostas para o rebalanceamento da linha em questão.

5.3 Discussão dos resultados

Analisando os resultados verificou-se que o balanceamento das ferramentas B3015 e B3030, da OP30 para a OP20, houve um ganho para a produção de aproximadamente 201 blocos de motor a mais por dia em comparação com o estado atual da linha (2064 blocos de motor), demonstrando ser este o cenário mais efetivo entre os estudados. Assim, nessa configuração, a linha alcançaria aproximadamente 2265 blocos por dia. Deve-se ressaltar, no entanto que houve modificação da operação que ditava o tempo de ciclo da linha nesse cenário, portanto o número de blocos de motor apresentados se refere tempo de ciclo da OP10, que agora configura um novo gargalo.

Durante a aplicação do método, pelo fato de a maioria das ferramentas serem aplicadas em mais de um produto, notou-se que o ideal é realizar a simulação de todos os centros de usinagem para todos os produtos. Porém por falta de dados acerca da usinagem dos outros produtos, não foi possível realizar esse processo.

Para que os resultados das ferramentas duplicadas sejam uma opção de balanceamento viável, seria necessário considerar os outros produtos que passam pela mesma linha de produção. Com essa consideração, deve-se verificar se o bloco em estudo é o que tem maior demanda. Se essa consideração for verdadeira, a duplicação da ferramenta se torna válida, pois o custo da duplicação poderá ser abatido por essa otimização.

6 Conclusão e Trabalhos Futuros

O desenvolvimento e domínio da simulação dinâmica de máquinas-ferramenta, auxiliada por um VNC para o rebalanceamento de uma linha de usinagem, possibilita a redução de tempo para implementação de modificações na linha de produção, redução de custos de máquina parada para testes e maior confiabilidade nas informações para alcançar melhores resultados. Com isso, obtém-se uma redução de custos de processo, o que o torna um diferencial para a empresa.

O rebalanceamento com as ferramentas B3015 e B3030 da OP30 para a OP20 apresentou um melhor nivelamento no tempo de ciclo da linha de usinagem, tendo uma variação na porcentagem dos tempos em processo das operações reduzida de 24,17% para 16,52% com rebalanceamento. Portanto, esse trabalho alcançou o objetivo proposto, construindo-se um método que possibilitou a realização de um rebalanceamento com resultados satisfatórios e maior exatidão para aplicação na linha real, pelo auxílio da simulação de máquinas-ferramenta.

Neste trabalho foram apontados resultados para um rebalanceamento de linha a partir do método desenvolvido, que pode ser implementado na linha real.

Porém, na não viabilidade da duplicação, outra opção para trabalhos futuros, a construção total do ambiente fabril virtual, para a simulação dos programas NC de todas as operações de todos os outros blocos de motor também configura uma opção. Isso possibilitaria a realização e verificação do balanceamento de toda a linha de produção para todos os produtos.

Outra verificação, realizada durante a simulação, e observada como possibilidade para um trabalho futuro, é o estudo de toda a linha de usinagem, considerando também as etapas que não são operações de usinagem. Essas etapas podem ser, muitas vezes, os gargalos que bloqueiam a saída de algumas operações de usinagem, configurando processos limitantes da linha de produção.

7 Bibliografia

- /1/ VDI-RICHTLINIEN. VDI 4499 - Digitale Fabrik Grundlagen, Fevereiro 2008.
- /2/ BRACHT, U. *Ansätze und Methoden der Digitalen Fabrik*. SimVis 2002 - Simulation und Visualisierung 2002. Magdeburg: [s.n.]. 2002.
- /3/ BRACHT, U.; MASURAT, T. The Digital Factory between vision and reality. *Computers in Industry*, 56, n. 4, Maio 2005. 325-333.
- /4/ GOMES, J. O.; SILVA, A. S. A.; SOUZA, G. O. Desenvolvimentos necessários para o fresamento em 5 eixos simultâneos. *3º Encontro da cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes*, São Paulo, 10 a 12 agosto 2005.
- /5/ TECNOMATIX - Part Planning and Validation, 23 agosto 2014. Disponível em: <http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/plan_validate/real_nc.shtml>.
- /6/ NX - Validação do programa do chão de fábrica, 23 agosto 2014. Disponível em: <http://www.plm.automation.siemens.com/pt_br/products/nx/for-manufacturing/shop-floor-program-validation/>.
- /7/ YANG, T. et al. Research on Plant Layout and Production Line running Simulation in Digital Factory Environment. *Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application*, Wuhan, 2008.
- /8/ KÜHN, W. Was ist eine Digitale Fabrik. In: KÜHN, W. *Digitale Fabrik - Fabriksimulation für Produktionsplaner*. Munique: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2006. Cap. 1, p. 493. ISBN 978-3-446-40619-3.
- /9/ STONE, K. Four Decades of Lean: A Systematic Literature Review. *International Journal of Lean Six Sigma*, March 2012. 112-132.
- /10/ BALLARD, G. et al. Production System Design: Work Structuring Revisited, January 2001.
- /11/ VOLKMANN, J. W.; CONSTANTINESCU, C. L. *Digital Factory Economics*. Proceedings 7th International Conference on Digital Enterprise Technology. Athens: [s.n.]. 2011.

- /12/ VIDAL, O. C. *Aplicação do conceito de Fábrica Digital no planejamento de instalações para armação de carroçarias na indústria automobilística*. Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva. São Paulo. 2006.
- /13/ HALLER, E.; SCHILLER, E. F.; HAR, I. Impact of the Digital Factory on the Production Planning Process. *Integrating Human Aspects in Production Management*, Boston, 2005.
- /14/ KÜHN, W. Digital Factory - Simulation Enhancing the Product and Production Engineering Process. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, n. 06, 2006. 1899-1906.
- /15/ CHEN, D.; KJELLBERG, T.; ASTRID, A. *Software Tools for the Digital Factory - An Evaluation and Discussion*. Proceedings of 6th International Conference on Digital Enterprise Technology. Berlin: [s.n.]. 2009.
- /16/ CAGGIANO, A. *Digital Factory Concept Implementation for Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems Modelling and Analysis*. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II. Nápoles, Itália. 2010. Tese de Doutorado em tecnologias e sistemas de produção.
- /17/ PAVANI, L. Usando simulação 3D, a Volkswagen reduziu em 1 milhão de reais os custos de desenvolvimento de novos veículos – e isso é só o começo. *Info Corporate*, v. 36, Setembro 2007.
- /18/ SOUZA, G. O. D. *Avaliação da Aplicação do Fresamento em 5 Eixos a Conjuntos de Superfícies Complexas*. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, p. 218. 2011. Tese de Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica.
- /19/ MIRALLES, C. E. *Análise de Estratégias de Corte no Fresamento com 5 eixos*. UNIMEP - Universidade Metodista de Piracicaba. Santa Bárbara d'Oeste, SP, p. 100. 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção.
- /20/ SCHÜTZER, K.; SOUZA, A. F.; STANIK, M. Aplicação da Usinagem com Altíssima Velocidade de Corte na Manufatura de Moldes e Matrizes. *Anais do Congresso Usinagem 2000*, 2000.

- /21/ SCHÜTZER, K. *Sistemas Computacionais de Apoio ao Projeto, Processo e Manufatura - Programação NC*. UNIMEP - Universidade Metodista de Piracicaba. Santa Barbara d'Oeste. 2007. Notas de Aula.
- /22/ SILVA, A. S. A. *Desenvolvimento Integrado CAD/CAM de Componentes para turbina a Gás*. Instituto Tecnológico da Aeronáutica. São José dos Campos - SP. 2006. Dissertação de Mestrado.
- /23/ WANG, Q. H.; LI, J. R.; ZHOU, R. R. Graphics-assisted approach to rapid collision detection for multi-axis machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 30, p. 853-863, 2006.
- /24/ SCHÜTZER, K. et al. Análise de parâmetros de usinagem via simulação virtual de máquinas-ferramenta. *Máquinas e Metais*, São Paulo, n. 601, p. 10-23, Fevereiro 2016.
- /25/ WECK, M.; BRECHER, C. *Werkzeugmaschinen 5 - Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität*. Berlin e Heidelberg: Springer, 2006. ISBN 978-3-540-32951-0.
- /26/ LIN, G. S. *System and Method for Constructing Virtual NC Controllers for Machine Tool Simulation*. US 8,577,655 B2, 5 Novembro 2013.
- /27/ SIEMENS. eM-RealNC NC-Simulation and Optimization. *PLM Automation Siemens*, 2007. Disponível em:
<http://www.plm.automation.siemens.com/zh_cn/Images/tx%20em%20real%20nc%20fs%20W%203_tcm78-47303.pdf>. Acesso em: 05 Abril 2016.
- /28/ PÓS-PROCESSAMENTO e simulação no NX CAM. *Siemens PLM Software*, 2016. Disponível em:
<https://www.plm.automation.siemens.com/pt_br/products/nx/for-manufacturing/cam/postprocessing-simulation.shtml>. Acesso em: 05 Abril 2016.
- /29/ NX CAM - Uma solução completa de manufatura assistida por computador. *Siemens PLM Software*, 2016. Disponível em:
<https://www.plm.automation.siemens.com/pt_br/products/nx/for-manufacturing/cam/>. Acesso em: 05 Abril 2016.

- /30/ NX CAM NC Simulation Add-On. *Siemens PLM Software*, 2010. Disponível em: <[https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/nx/for-manufacturing/cam/postprocessing-simulation.shtml#lightview%26url=/en_us/Images/Siemens-PLM-NX-CAM-NC-Simulation-Add-On-fs_tcm1023-118148.pdf%26title=NX CAM NC Simulation Add-On%26description=NX](https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/nx/for-manufacturing/cam/postprocessing-simulation.shtml#lightview%26url=/en_us/Images/Siemens-PLM-NX-CAM-NC-Simulation-Add-On-fs_tcm1023-118148.pdf%26title=NX%20CAM%20NC%20Simulation%20Add-On%26description=NX)>. Acesso em: 19 Julho 2016.
- /31/ WECK, M.; BRECHER, C. *Werkzeugmaschinen 3 - Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose*. 6. ed. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2006. ISBN 978-3-540-32506-2.
- /32/ WECK, M.; BRECHER, C. *Werkzeugmaschinen 4 - Automatisierung von Maschinen und Anlagen*. 6. ed. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2006. ISBN 978-3-540-45366-6.
- /33/ ALTINTAS, Y. *Manufacturing Automation - Metal Cutting Mechanics, Machine tool Vibrations and CNC Design*. New York: Cambridge University Press, 2000. ISBN 978-0521-65973-4.
- /34/ XU, X.-X.; MA, S.-J.; HUANG, P.-T. New Concepts In Electromagnetic Jerky Dynamics And Their Applications In Transient Processes Of Electric Circuit. *Progress In Electromagnetics Research M*, 8, 2009. 181-194.
- /35/ PANDILOV, Z.; DUKOVSKI, V. Analytical Determination of the CNC Machines High-Speed Feed Drives Position Loop Gain. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Skopje, 555, n. 2, Junho 2014. 505-510.
- /36/ AGOSTINHO, O. L.; VILELLA, C. R.; BUTTON, S. T. *Processos de Fabricação e Planejamento de Processos*. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2004. Apostila Introdução à Engenharia de Fabricação.
- /37/ HALEVI, G. *Process and Operation Planning*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. ISBN 1-4020-1653-0.
- /38/ DEMBOGURSKI, R. A.; OLIVEIRA, M.; NEUMANN, C. Balanceamento de Linha de Produção. *XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Rio de Janeiro, 13 a 16 outubro 2008.

- /39/ ROCHA, D. R. *Balanceamento De Linha – Um Enfoque Simplificado*. Faculdade 7 de Setembro. Fortaleza. 2005. Material preparado por Duílio Reis da Rocha.
- /40/ ROCHA, D. *Fundamentos Técnicos da Produção*. São Paulo: Makron Books, 1995. ISBN 85-346-0545-9.
- /41/ TUBINO, D. F. *Planejamento e Controle da Produção: Teoria e Prática*. São Paulo: Atlas, 2009.
- /42/ FENANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M. *Planejamento e Controle da Produção: dos fundamentos ao essencial*. São Paulo: Atlas, 2010.
- /43/ SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. *Administração da Produção*. Tradução de Henrique Luiz Corrêa. 3a. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A, 2009.
- /44/ RICH, N. et al. *Lean Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- /45/ OHNO, T. *O Sistema Toyota de Produção*. Porto Alegre: Bookman, 1997.
- /46/ DAVIS, M. M.; AQUILANO, N. J.; CHASE, R. B. *Fundamentos da Administração da Produção - Fundamentals of operations management*. 3ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. ISBN 0-256-22557-5.
- /47/ WOMACK, J. P.; JONES, D. T. *Lean thinking: banish waste and create wealth in your corporation*. New York: Simon and Schuster, 2010.
- /48/ ALVAREZ, R. D. R.; ANTUNES JR., J. A. V. Takt-time: conceitos e contextualização dentro do sistema toyota de produção. *Gestão & Produção*, 8, n. 1, Abril 2001. 1-18.
- /49/ DILWORTH, J. B. *Operations Management - Design, Planning and Control for Manufacturing and Services*. Birmingham: Mcgraw-Hill College, 1996. ISBN 0070169888.
- /50/ SCHNEIDER, U. et al. Operational Excellence in Practice: the Application of a Takt-Time Analysis in Pharmaceutical Manufacturing. *Springer Science+Business Media*, New York, 10 Janeiro 2015. 99-108.

- /51/ MAHAPATRA, S. S.; MOHANTY, S. R. Lean manufacturing in continuous process industry: An empirical study. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 66, Janeiro 2007. 19-27.
- /52/ WANG, Y.-C.; ZHAO, Q.-C.; ZHENG, D.-Z. Bottlenecks in production networks: an overview. *Journal of systems science and systems engineering*, 14, n. 3, 2005. 347-363.
- /53/ GOLDRATT, E. M.; COX, J. *The Goal: A process of ongoing improvement*. Great Barrington: North River Press, 1992. ISBN 0884271951.
- /54/ BUSS, A. H.; LAWRENCE, S. R. Economic analysis of production bottlenecks. *Mathematical problems in engineering*, 1, n. 4, janeiro 1995. 341-369.
- /55/ BETTERTON, C. E.; SILVER, S. J. Detecting bottlenecks in serial production lines – a focus on interdeparture time variance. *International Journal of Production Research*, Charleston, SC, 50, n. 15, 1 Agosto 2012. 4158-4174.
- /56/ ROSER, C.; NAKANO, M. *A Quantitative Comparison of Bottleneck Detection Methods in Manufacturing Systems with Particular Consideration for Shifting Bottlenecks*. Proceedings of the International Conference on the Advances. Tokyo, Japan: [s.n.]. 2015.
- /57/ CHIANG, S. Y.; KUO, C. T.; MEERKOV, S. M. C-bottlenecks in serial production lines – identification and application. *Mathematical Problems in Engineering*, Ann Arbor, 7, 2001. 543-578.
- /58/ LEPORIS, M.; KRÁLOVÁ, Z. A Simulation Approach To Production Line Bottleneck Analysis. *Internet Conference Cybernetics and Informatics*, VYŠNÁ BOCA, 10-13 February 2010.
- /59/ LI, L.; CHANG, Q.; NI, J. . Data driven bottleneck detection of manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 47, n. 18, 2009a. 5019–5036.
- /60/ DOU, J. P.; DAI, X.; MENG, Z. Precedence graph-oriented approach to optimise single-product flow-line configurations of reconfigurable manufacturing system.

International Journal of Computer Integrated Manufacturing, China, Vol 22, n. 10, 10 October 2009. 923-940. Disponível em: <<http://www.informaworld.com>>.

- /61/ FESTUGATTO, J. R. et al. Aplicação da metodologia de balanceamento de linhas na empresa Atlas Eletrodomésticos Ltda. *XXVI ENEGEP*, Fortaleza, 9 a 11 Outubro 2006.
- /62/ NICOSIA, G.; PACCIARELLI, D.; PACIFICI, A. Optimally balancing assembly lines with different workstations. *Discrete Applied Mathematics*, Roma, 118, 15 Abril 2002. 99-113. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166218X01002591>>.
- /63/ REGINATO, G.; ANZANELLO, M. J.; KAHMANN, A. Mixed assembly line balancing method in scenatios with different mix of products. *Gestão & Produção*, São Carlos, v. 23(2), p. 294-307, junho 2016.
- /64/ GHUTUKADE, S. T.; SAWANT, S. M. Use of Ranked Position Weighted Method for Assembly Line Balancing. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 2, n. 4, Julho-Setembro 2013. 01-03.
- /65/ CHOW, W.-M. *Assembly Line Design: Methodology and Applications*. New York: Marcel Dekker, 1990.
- /66/ PRAÇA, I. C. C. S. *Balanceamento e Simulação de linhas de fabrico manuais*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. 1996. Tese de mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.
- /67/ REGINATO, G. *Métodos de Balanceamento de Linhas de Montagem Uni-Modelo e Mista*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2014.
- /68/ SIEMENS PLM SOFTWARE. Machining Line Planner. *Siemens Tecnomatix*, 2010. Disponível em: <https://www.plm.automation.siemens.com/es_es/Images/16796_tcm52-82692.pdf>. Acesso em: 15 Agosto 2016.
- /69/ SIEMENS PLM SOFTWARE. Tecnomatix Plant Simulation - Manufacturing Simulation and Validation. *Siemens PLM*, 2016. Disponível em:

<http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml>. Acesso em: 15 Agosto 2016.

- /70/ SIEMENS PLM SOFTWARE. Tecnomatix for Plant Simulation. *Simulação e otimização de fábrica, linha e processo*, 2013. Disponível em: <[http://www.plm.automation.siemens.com/pt_br/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml#lightview%26url=/pt_br/Images/7541_tcm882-4957.pdf%26title=Tecnomatix for Plant Simulation%26description=Simulação e otimização](http://www.plm.automation.siemens.com/pt_br/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml#lightview%26url=/pt_br/Images/7541_tcm882-4957.pdf%26title=Tecnomatix%20for%20Plant%20Simulation%26description=Simulação%20e%20otimização) d>. Acesso em: 15 Agosto 2016.
- /71/ SAKAMOTO, B. *Análise do Fluxo de Valor Auxiliado por Simulação para a Redução do Consumo de Energia Elétrica nos Processos de Produção*. UNIMEP - Universidade Metodista de Piracicaba. Santa Barbara D'Oeste. 2016. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção.
- /72/ THULASIRAMAN, K.; SWAMY, M. N. S. *Graphs: Theory and Algorithms*. Montreal: Wiley-Interscience Publication, 1992. ISBN 0471513563.
- /73/ BANG-JENSEN, J.; GUTIN, G. *Digraphs*. 2ª. ed. London: Springer Science+Business Media , 2009. ISBN 1-84800-997-6.
- /74/ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 6983: Automation systems and integration — Numerical control of machines — Program format and definitions of address words. 2ª. ed. [S.l.]: [s.n.], 2009. p. 26. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:6983:-1:ed-2:v1:en>>. Acesso em: 04 Novembro 2016.

Anexo 1 – Documentação Operação 10, Parte 1

OP 10		Bloco do Motor - 3 Cilindros				
Ferramenta	Operação	Especificação	Tempo de Troca de ferramenta [s]	Tempo de Operação (Em vazio e em Corte) [s]	Tempo Acumulado [s]	Lado do bloco
	Troca	Inserir Primeira Ferramenta: B1019	4,678		4,678	
B1019	Posicionamento inicial	+ Rotação da mesa A		2,964	7,642	Cabeçote
B1019	Posicionamento	Posicionamento em G0		0,532	8,174	
B1019	Aproximação	Aproximação em G0		0,168	8,342	
B1019	Face 1F1	Faceamento em G1		3,78	12,122	
B1019	Recuo	Retorno em G0		0,296	12,418	
B1019	Acabado	Tempo da Operação B1019 sem o tempo de tro	4,678	7,74	12,418	
	Troca de Ferramenta	B1019 para B1001	4,206		16,624	
B1001	Posicionamento inicial	+ Rotação das mesas B		0,952	17,576	Carter
B1001	Aproximação	Aproximação em G0		0,956	18,532	
B1001	Face 6F1	Início do Faceamento		0,408	18,94	
B1001	Face 6F1	Faceamento da primeira parte		0,776	19,716	
B1001	Face 6F1	Início do faceamento da segunda parte		0,852	20,568	
B1001	Face 6F1	Finalização do Faceamento		0,704	21,272	
B1001	Recuo	Retorno em G0		0,184	21,456	
B1001	Acabado	Tempo total da Operação B1001	4,206	4,832	21,456	
	Troca de Ferramenta	B1001 para B1003	4,274		25,73	
B1003	Posicionamento inicial			0,952	26,682	Carter
B1003	Posicionamento	Aproximação a partir da troca em G0		1	27,682	
B1003	Face 6F2	Faceamento		1,996	29,678	
B1003	Recuo	Retorno em G0		0,232	29,91	
B1003	Acabado	Tempo total da Operação B1003	4,274	4,18	29,91	
	Troca de Ferramenta	B1003 para B1004	4,294		34,204	
B1004	Posicionamento inicial	+ Rotação das mesas B		0,952	35,156	Cabeçote
B1004	Posicionamento	Alinhamento com o furo G0		0,948	36,104	
B1004	Furo 1B992	Furação		0,728	36,832	
B1004	Recuo	Retorno em G0		0,112	36,944	
B1004	Acabado	Tempo total da Operação B1004	4,294	2,74	36,944	
	Troca de Ferramenta	B1004 para B1005	4,314		41,258	
B1005	Posicionamento inicial			0,952	42,21	Cabeçote
B1005	Posicionamento	Alinhamento com o furo G0		0,948	43,158	
B1005	Furo 1B997	Furação e alargamento do furo		0,86	44,018	
B1005	Recuo	Retorno em G0		0,116	44,134	
B1005	Acabado	Tempo total da Operação B1005	4,314	2,876	44,134	
	Troca de Ferramenta	B1005 para B1036	4,32		48,454	
B1036	Posicionamento inicial			0,952	49,406	Cabeçote
B1036	Posicionamento	Alinhamento com o primeiro furo G0		0,9	50,306	
B1036	Furo 1B22	Furação e alargamento do furo		2,28	52,586	
B1036	Recuo	Retorno em G0		0,22	52,806	
B1036	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,432	53,238	
B1036	Furo 1B24	Furação e alargamento do furo		2,28	55,518	
B1036	Recuo	Retorno em G0		0,22	55,738	
B1036	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,432	56,17	
B1036	Furo 1B26	Furação e alargamento do furo		2,28	58,45	
B1036	Recuo	Retorno em G0		0,22	58,67	
B1036	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,432	59,102	
B1036	Furo 1B28	Furação e alargamento do furo		2,28	61,382	
B1036	Recuo	Retorno em G0		0,22	61,602	
B1036	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,708	62,31	
B1036	Furo 1B25	Furação e alargamento do furo		2,28	64,59	
B1036	Recuo	Retorno em G0		0,22	64,81	
B1036	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,432	65,242	
B1036	Furo 1B23	Furação e alargamento do furo		2,28	67,522	
B1036	Recuo	Retorno em G0		0,22	67,742	
B1036	Acabado	Tempo total da Operação B1036	4,32	19,288	67,742	
	Troca de Ferramenta	B1036 para B1037	4,284		72,026	
B1037	Posicionamento inicial			0,952	72,978	Cabeçote
B1037	Posicionamento	Alinhamento com o primeiro furo G0		0,92	73,898	
B1037	Furo 1B27	Furação, alargamento e chanfro		2,28	76,178	
B1037	Recuo	Retorno em G0		0,22	76,398	
B1037	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,62	77,018	
B1037	Furo 1B21	Furação, alargamento e chanfro		2,28	79,298	
B1037	Recuo	Retorno em G0		0,22	79,518	
B1037	Acabado	Tempo total da Operação B1037	4,284		79,518	
	Troca de Ferramenta	B1037 para B1013	4,28		83,798	
B1013	Posicionamento inicial			0,952	84,75	Cabeçote
B1013	Posicionamento	Alinhamento com o primeiro furo G0		0,956	85,706	
B1013	Furo 1B21	Alargamento		0,536	86,242	
B1013	Recuo	Retorno em G0		0,088	86,33	
B1013	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,62	86,95	
B1013	Furo 1B27	Alargamento		0,536	87,486	
B1013	Recuo	Retorno em G0		0,088	87,574	
B1013	Acabado	Tempo total da Operação B1013	4,28	3,776	87,574	
	Troca de Ferramenta	B1013 para B1009	4,322		91,896	

Anexo 2 – Documentação Operação 10, Parte 2

OP 10		Bloco do Motor - 3 Cilindros				
Ferramenta	Operação	Especificação	Tempo de Troca de ferramenta [s]	Tempo de Operação (Em vazio e em Corte) [s]	Tempo Acumulado [s]	Lado do bloco
	Troca de Ferramenta	B1013 para B1009	4,322		91,896	
B1009	Posicionamento inicial			0,952	88,526	Cabeçote
B1009	Posicionamento	Alinhamento com o primeiro furo em G0		0,928	89,454	
B1009	Furo 1B27	Roscamento usando função L833		2,11	91,564	
B1009	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,828	92,392	
B1009	Furo 1B28	Roscamento usando função L833		2,146	94,538	
B1009	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,456	94,994	
B1009	Furo 1B26	Roscamento usando função L833		2,146	97,14	
B1009	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,828	97,968	
B1009	Furo 1B25	Roscamento usando função L833		2,146	100,114	
B1009	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,456	100,57	
B1009	Furo 1B23	Roscamento usando função L833		2,146	102,716	
B1009	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,828	103,544	
B1009	Furo 1B24	Roscamento usando função L833		2,146	105,69	
B1009	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,456	106,146	
B1009	Furo 1B22	Roscamento usando função L833		2,146	108,292	
B1009	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,828	109,12	
B1009	Furo 1B21	Roscamento usando função L833		2,146	111,266	
B1009	Acabado	Tempo total da Operação B1009	4,322	23,692	111,266	
	Troca de Ferramenta	B1009 para B1011	4,61		115,876	
B1011	Posicionamento inicial	+ Rotação da mesa A		1,324	117,2	Carter
B1011	Posicionamento	Alinhamento com a face a ser furada G0		0,908	118,108	
B1011	Furo 6B100	Furação com chanfro		1,272	119,38	
B1011	Recuo	Retorno em G0		0,168	119,548	
B1011	Acabado	Tempo total da Operação B1011	4,61	3,672	119,548	
	Troca de Ferramenta	B1011 para B1012	4,438		123,986	
B1012	Posicionamento inicial			1,324	125,31	Carter
B1012	Posicionamento	Alinhamento com o furo em G0		0,92	126,23	
B1012	Furo 6B180	Furação e rebaixo		0,76	126,99	
B1012	Recuo	Retorno em G0		0,44	127,43	
B1012	Posicionamento	Rotação da mesa		1,276	128,706	Cabeçote
B1012	Posicionamento	Alinhamento com o furo em G0		0,408	129,114	
B1012	Furo 1B993	Furação		0,616	129,73	
B1012	Recuo	Retorno em G0		0,14	129,87	
B1012	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,748	130,618	
B1012	Movimentação	Aproximacao em G0		0,032	130,65	
B1012	Furo 1B999	Furação		0,616	131,266	
B1012	Recuo	Retorno em G0		0,14	131,406	
B1012	Acabado	Tempo total da Operação B1012	4,438	7,42	131,406	
	Troca de Ferramenta	B1012 para B1021	4,642		136,048	
B1021	Posicionamento inicial	+ Rotação da mesa A		1,324	137,372	Carter
B1021	Posicionamento	Alinhamento com a face a ser furada G0		1,092	138,464	
B1021	Furo 6B100	Furação e chanfro		0,716	139,18	
B1021	Recuo	Retorno em G0		0,14	139,32	
B1021	Acabado	Tempo total da Operação B1021	4,642	3,272	139,32	
	Troca de Ferramenta	B1021 para B1017	4,694		144,014	
B1014	Posicionamento inicial	+ Rotação da mesa A		1,324	145,338	Cabeçote
B1014	Posicionamento	Alinhamento com o furo em G0		1,072	146,41	
B1014	Furo 1B993	Alargamento do furo e chanfro		0,932	147,342	
B1014	Recuo	Retorno em G0		0,152	147,494	
B1014	Acabado	Tempo total da Operação B1014	4,694	3,48	147,494	
B1015	Troca de Ferramenta	B1014 para B1015	4,658		152,152	
B1015	Posicionamento inicial			1,324	153,476	Cabeçote
B1015	Posicionamento	Alinhamento com o furo em G0		1,076	154,552	
B1015	Furo 1B993	Furação e rebaixo		0,844	155,396	
B1015	Recuo	Retorno em G0		0,144	155,54	
B1015	Acabado	Tempo total da Operação B1015	4,658	3,388	155,54	
B1016	Troca de Ferramenta	B1015 para B1016	4,67		160,21	
B1016	Posicionamento inicial			1,324	161,534	Cabeçote
B1016	Posicionamento	Alinhamento com o furo em G0		1,064	162,598	
B1016	Furo 1B999	Alargamento do furo e chanfro		0,892	163,49	
B1016	Recuo	Retorno em G0		0,148	163,638	
B1016	Acabado	Tempo total da Operação B1016	4,67	3,428	163,638	
	Troca de Ferramenta	B1016 para B1017	4,642		168,28	
B1017	Posicionamento inicial			1,324	169,604	
B1017	Posicionamento inicial	Alinhamento com o furo em G0		1,064	170,668	
B1017	Furo 1B999	Alargamento		0,512	171,18	
B1017	Recuo	Retorno em G0		0,144	171,324	
B1017	Acabado	Tempo total da Operação B1017	4,642	9,312	171,324	
	Troca de Ferramenta	B1017 para B1020	4,658		175,982	
B1020	Posicionamento inicial	+ Rotação da mesa A e B		2,996	178,978	
B1020	Posicionamento inicial	Alinhamento com a face em G0		0,664	179,642	
B1020	Face 1F1	Faceamento da lateral esquerda		2,012	181,654	
B1020	Face 1F1	Faceamento do canto inferior esquerdo		0,54	182,194	
B1020	Face 1F1	Faceamento da parte de baixo interpolada em G3		0	182,194	
B1020	Face 1F1	Faceamento da lateral direita inferior		0,956	183,15	
B1020	Face 1F1	Faceamento da lateral direita inferior		0	183,15	
B1020	Face 1F1	Faceamento da lateral direita		2,524	185,674	
B1020	Recuo	Retorno em G0		0,748	186,422	
B1020	Acabado	Tempo total da Operação B1020	4,658	10,44	186,422	
	Troca de Ferramenta	B1020 para B1019 primeira Ferramenta	4,558		190,98	
B1019	Posicionamento inicial	+ Rotação da mesa A		0,9	191,88	
		Fim da OP10			191,88	

Anexo 3 – Documentação Operação 20, Parte 1

OP 20		Bloco do Motor - 3 Cilindros				
Ferramenta	Operação	Especificação	Tempo de Troca de ferramenta [s]	Tempo de Operação (Em vazio e em Corte) [s]	Tempo Acumulado [s]	Lado do bloco
	Troca	Inserir Primeira Ferramenta: B2001	6,176		6,176	
B2001	Posicionamento inicial	+ Rotação da mesa A		0,696	6,872	Selo
B2001	Posicionamento	Posicionamento em G0		0,652	7,524	
B2001	Aproximação	Aproximação em G0		0,540	8,064	
B2001	Face 5F23	Faceamento em G1		0,460	8,524	
B2001	Recuo	Retorno em G0		0,356	8,88	
B2001	Movimentação	Rotação da mesa A		0,868	9,748	Carter - tilt
B2001	Aproximação	Aproximação em G0		0,456	10,204	
B2001	Face 64F4	Faceamento em G1 no1		0,280	10,484	
B2001	Face 64F4	Faceamento em G1 no2		0,296	10,78	
B2001	Recuo	Retorno em G0		0,232	11,012	
B2001	Aproximação	Aproximação em G0			11,012	
B2001	Aproximação	Aproximação em G0		0,296	11,308	
B2001	Face 64F3	Faceamento em G1 no1			11,308	
B2001	Face 64F3	Faceamento em G1 no2			11,308	
B2001	Recuo	Retorno em G0		0,232	11,54	
B2001	Aproximação	Aproximação em G0			11,54	
B2001	Aproximação	Aproximação em G0		0,296	11,836	
B2001	Face 64F2	Faceamento em G1 no1			11,836	
B2001	Face 64F2	Faceamento em G1 no2			11,836	
B2001	Recuo	Retorno em G0		0,232	12,068	
B2001	Acabado	Tempo total da Operação B2001	6,176	5,892	12,068	
	Troca de Ferramenta	B2001 para B2002	5,752		17,82	
B2002	Posicionamento inicial	+ Rotação da mesa A		0,952	18,772	Selo
B2002	Aproximação	Aproximação em G0		0,756	19,528	
B2002	Face 5F47	Faceamento em G1, parte 1		0,204	19,732	
B2002	Movimentação	Movimentação dento das faces em G0		0,156	19,888	
B2002	Movimentação	Movimentação dento das faces em G0		0,076	19,964	
B2002	Face 5F47	Faceamento em G1, parte 2		0,200	20,164	
B2002	Aproximação	Aproximação em G0		0,236	20,4	
B2002	Aproximação	Aproximação em G0 em z			20,4	
B2002	Face 5F45	Faceamento em G1, parte 1		0,264	20,664	
B2002	Movimentação	Movimentação dento das faces em G1		0,160	20,824	
B2002	Movimentação	Movimentação dento das faces em G1			20,824	
B2002	Face 5F45	Faceamento em G1, parte 2		0,228	21,052	
B2002	Aproximação	Aproximação em G0			21,052	
B2002	Aproximação	Aproximação em G0			21,052	
B2002	Face 5F49	Faceamento em G1			21,052	
B2002	Recuo	Retorno em G0		0,496	21,548	
B2002	Movimentação	Rotação da mesa A			21,548	Blow by
B2002	Aproximação	Aproximação em G0		0,492	22,04	
B2002	Face 4F56	Faceamento em G1			22,04	
B2002	Recuo	Retorno em G0		0,096	22,136	
B2002	Movimentação	Rotação da mesa A		0,556	22,692	Blow by - tilt
B2002	Aproximação	Aproximação em G0		0,344	23,036	
B2002	Face 44F65	Faceamento em G1, parte 1		0,228	23,264	
B2002	Face 44F65	Faceamento em G1, parte 2		0,000	23,264	
B2002	Recuo	Retorno em G0		0,288	23,552	
B2002	Acabado	Tempo total da Operação B2002	5,752	5,732	23,552	
	Troca de Ferramenta	B2002 para B2003	5,664		29,216	
B2003	Posicionamento inicial			0,952	30,168	Blow by
B2003	Aproximação	Aproximação em G0		0,784	30,952	
B2003	Aproximação	Aproximação em G0		0,004	30,956	
B2003	Face 44F50	Faceamento em G1 movimento 1		0,584	31,540	
B2003	Face 44F50	Faceamento em G1 movimento 2		0,436	31,976	
B2003	Face 44F50	Faceamento em G1 movimento 3		0,296	32,272	
B2003	Face 44F50	Faceamento em G1 movimento 4		0,360	32,632	
B2003	Face 44F50	Faceamento em G1 movimento 5		0,344	32,976	
B2003	Face 44F50	Faceamento em G1 movimento 6		0,284	33,260	
B2003	Face 44F50	Faceamento em G1 movimento 7		0,420	33,68	
B2003	Movimentação	Direcionamento para o próximo parte da faceamento em G0		0,028	33,708	
B2003	Movimentação	Direcionamento para o próximo parte da		0,136	33,844	
B2003	Movimentação	Direcionamento para o próximo parte da faceamento em G0		0,076	33,92	
B2003	Face 44F50	Faceamento em G1 movimento 8		0,136	34,056	
B2003	Face 44F50	Faceamento em G1 movimento 9		0,228	34,284	
B2003	Face 44F50	Faceamento em G1 movimento 10		0,180	34,464	
B2003	Face 44F50	Faceamento em G1 movimento 11		0,196	34,66	
B2003	Recuo	Retorno em G0		0,004	34,664	
B2003	Acabado	Tempo total da Operação B2003	5,664	5,448	34,664	
	Troca de Ferramenta	B2003 para B2004	5,880		40,544	
B2004	Posicionamento inicial			0,952	41,496	Blow by
B2004	Aproximação	Aproximação em G0		0,736	42,232	
B2004	Furo 44B65	Furação em G1		1,824	44,056	
B2004	Recuo	Retorno em G0		0,164	44,220	
B2004	Acabado	Tempo total da Operação B2004	5,88	3,676	44,220	
	Troca de Ferramenta	B2004 para B2005	5,756		49,976	
B2005	Posicionamento inicial			0,952	50,928	
B2005	Aproximação	Aproximação em G0		0,760	51,688	
B2005	Furo 44B65	Furação/aumento em G1		0,480	52,168	
B2005	Recuo	Retorno em G0		0,084	52,252	
B2005	Acabado	Tempo total da Operação B2005	5,756	2,276	52,252	
	Troca de Ferramenta	B2005 para B2007	5,780		58,032	

Anexo 4 – Documentação Operação 20, Parte 2

OP 20		Bloco do Motor - 3 Cilindros				
Ferramenta	Operação	Especificação	Tempo de Troca de ferramenta [s]	Tempo de Operação (Em vazio e em Corte) [s]	Tempo Acumulado [s]	Lado do bloco
	Troca de Ferramenta	B2005 para B2007	5,780		58,032	
B2007	Posicionamento inicial			0,952	58,984	
B2007	Aproximação	Aproximação em G0		0,724	59,708	
B2007	Aproximação	Aproximação em G0		0,196	59,904	
B2007	Furo 44B50	Furação em G1		0,584	60,488	
B2007	Recuo	Retorno em G0		0,124	60,612	
B2007	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,456	61,068	
B2007	Furo 44B51	Furação em G1		0,584	61,652	
B2007	Recuo	Retorno em G0		0,124	61,776	
B2007	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,420	62,196	
B2007	Furo 44B52	Furação em G1		0,584	62,78	
B2007	Recuo	Retorno em G0		0,124	62,904	
B2007	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,340	63,244	
B2007	Furo 44B53	Furação em G1		0,584	63,828	
B2007	Recuo	Retorno em G0		0,124	63,952	
B2007	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,424	64,376	
B2007	Furo 44B54	Furação em G1		0,584	64,96	
B2007	Recuo	Retorno em G0		0,124	65,084	
B2007	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,416	65,5	
B2007	Furo 44B55	Furação em G1		0,584	66,084	
B2007	Recuo	Retorno em G0		0,124	66,208	
B2007	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,408	66,616	
B2007	Furo 44B56	Furação em G1		0,584	67,2	
B2007	Recuo	Retorno em G0		0,124	67,324	
B2007	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,336	67,66	
B2007	Furo 44B57	Furação em G1		0,584	68,244	
B2007	Recuo	Retorno em G0		0,124	68,368	
B2007	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,376	68,744	
B2007	Furo 44B58	Furação em G1		0,584	69,328	
B2007	Recuo	Retorno em G0		0,124	69,452	
B2007	Acabado	Tempo total da Operação B2007	5,780	11,420	69,452	
	Troca de Ferramenta	B2007 para B2022	5,876		75,328	
B2022	Posicionamento inicial			0,952	76,280	
B2022	Aproximação	Aproximação em G0		0,720	77,000	
B2022	Rosca Furo 44B50	Roscamento com L833		0,810	77,810	
B2022	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,572	78,382	
B2022	Rosca Furo 44B51	Roscamento com L833		0,810	79,192	
B2022	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,524	79,716	
B2022	Rosca Furo 44B52	Roscamento com L833		0,810	80,526	
B2022	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,356	80,882	
B2022	Rosca Furo 44B53	Roscamento com L833		0,810	81,692	
B2022	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,532	82,224	
B2022	Rosca Furo 44B54	Roscamento com L833		0,810	83,034	
B2022	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,520	83,554	
B2022	Rosca Furo 44B55	Roscamento com L833		0,810	84,364	
B2022	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,512	84,876	
B2022	Rosca Furo 44B56	Roscamento com L833		0,810	85,686	
B2022	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,352	86,038	
B2022	Rosca Furo 44B57	Roscamento com L833		0,810	86,848	
B2022	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,388	87,236	
B2022	Rosca Furo 44B58	Roscamento com L833		0,810	88,046	
B2022	Acabado	Tempo total da Operação B2022	5,876	12,718	88,046	
	Troca de Ferramenta	B2022 para B2013	5,962		94,008	
B2013	Posicionamento inicial	+ Rotação da mesa A		1,324	95,332	Carter
B2013	Aproximação	Aproximação em G0		0,640	95,972	
B2013	Furo 6B55	Furação em G1		0,540	96,512	
B2013	Recuo	Retorno em G0		0,132	96,644	
B2013	Acabado	Tempo total da Operação B2013	5,962	2,636	96,644	
	Troca de Ferramenta	B2013 para B2014	5,808		102,452	
B2014	Posicionamento inicial			1,324	103,776	
B2014	Aproximação	Aproximação em G0		0,648	104,424	
B2014	Furo 6B55	Furação em G1		0,924	105,348	
B2014	Recuo	Retorno em G0		0,120	105,468	
B2014	Acabado	Tempo total da Operação B2014	5,808	3,016	105,468	
	Troca de Ferramenta	B2014 para B2015	5,820		111,288	
B2015	Posicionamento inicial	+ Rotação da mesa A		1,324	112,612	Selo - tilt
B2015	Aproximação	Aproximação em G0		0,604	113,216	
B2015	Aproximação	Aproximação em G0 em Y		0,368	113,584	
B2015	Aproximação	Aproximação em G0 em Z		0,372	113,956	
B2015	Operacao 6F2/1.1-1.5	Fresamento radial em G1		2,312	116,268	
B2015	Recuo	Retorno em G0 em Y		0,284	116,552	
B2015	Recuo	Retorno em G0 em Z		0,412	116,964	
B2015	Movimentação	Rotação da mesa A		1,036	118	Carter - tilt
B2015	Aproximação	Aproximação em G0 em Z		0,464	118,464	
B2015	Aproximação	Aproximação em G0 em Y		0,352	118,816	
B2015	Operacao 6F2/2.1-2.5	Fresamento radial em G1		2,312	121,128	
B2015	Recuo	Retorno em G0 em Y		0,268	121,396	
B2015	Recuo	Retorno em G0 em Z		0,348	121,744	
B2015	Acabado	Tempo total da Operação B2015	5,82	10,456	121,744	
	Troca de Ferramenta	B2015 para B2016	5,836		127,580	

Anexo 5 – Documentação Operação 20, Parte 3

OP 20		Bloco do Motor - 3 Cilindros				
Ferramenta	Operação	Especificação	Tempo de Troca de ferramenta [s]	Tempo de Operação (Em vazio e em Corte) [s]	Tempo Acumulado [s]	Lado do bloco
	Troca de Ferramenta	B2015 para B2016	5,836		127,580	
B2016	Posicionamento inicial	Rotação da mesa A		1,324	128,904	Carter - tilt 2
B2016	Aproximação	Aproximação em G0		0,792	129,696	
B2016	Furo 64B2	Furação em G1		0,924	130,62	
B2016	Recuo	Retorno em G0		0,276	130,896	
B2016	Posicionamento	Alinhamento com o proximo furo G0		0,576	131,472	
B2016	Aproximação	Aproximação em G0		0,244	131,716	
B2016	Furo 64B3	Furação em G1		0,924	132,64	
B2016	Recuo	Retorno em G0		0,276	132,916	
B2016	Posicionamento	Alinhamento com o proximo furo em G0		0,576	133,492	
B2016	Aproximação	Aproximação em G0		0,244	133,736	
B2016	Furo 64B4	Furação em G1		0,924	134,66	
B2016	Recuo	Retorno em G0		0,276	134,936	
B2016	Acabado	Tempo total da Operação B2016	5,836	7,356	134,936	
	Troca de Ferramenta	B2016 para B2017	5,852		140,788	
B2007	Posicionamento inicial			1,324	142,112	
B2017	Aproximação	Aproximação em G0		0,792	142,904	
B2017	Rosca Furo 64B2	Roscamento com L833		1,030	143,934	
B2017	Posicionamento	Alinhamento com o proximo furo em G0		0,576	144,51	
B2017	Rosca Furo 64B3	Roscamento com L833		1,290	145,8	
B2017	Posicionamento	Alinhamento com o proximo furo em G0		0,576	146,376	
B2017	Rosca Furo 64B4	Roscamento com L833		1,290	147,666	
B2017	Acabado	Tempo total da Operação B2017	5,852	6,878	147,666	
	Troca de Ferramenta	B2017 para B2018	5,848		153,514	
B2018	Posicionamento inicial	+ Rotação da mesa A		1,324	154,838	Selo
B2018	Aproximação	Aproximação em G0		0,788	155,626	
B2018	Furo 5B23	Furação em G1, primeiro nivel do ferramenta		1,064	156,69	
B2018	Furo 5B23	Furação em G1, segundo nivel do ferramenta		1,980	158,67	
B2018	Recuo	Retorno em G0		0,260	158,93	
B2018	Acabado	Tempo total da Operação B2018	5,848	5,416	158,93	
	Troca de Ferramenta	B2018 para B2019	6,024		164,954	
B2019	Posicionamento inicial			1,324	166,278	
B2019	Aproximação	Aproximação em G0		0,784	167,062	
B2019	Rosca Furo 5B23	Roscamento com L833		2,050	169,112	
B2019	Acabado	Tempo total da Operação B2019	6,024	4,158	169,112	
	Troca de Ferramenta	B2019 para B2020	6,040		175,152	
B2020	Posicionamento			1,324	176,476	
B2020	Aproximação	Aproximação em G0		0,772	177,248	
B2020	Furo 5B47	Furação em G1		0,944	178,192	
B2020	Recuo	Retorno em G0		0,156	178,348	
B2020	Posicionamento	Alinhamento com o proximo furo em G0		0,532	178,88	
B2020	Furo 5B48	Furação em G1		0,944	179,824	
B2020	Recuo	Retorno em G0		0,156	179,98	
B2020	Posicionamento	Alinhamento com o proximo furo em G0		0,460	180,44	
B2020	Aproximação	Aproximação em G0		0,148	180,588	
B2020	Furo 5B46	Furação em G1		0,944	181,532	
B2020	Recuo	Retorno em G0		0,156	181,688	
B2020	Posicionamento	Alinhamento com o proximo furo em G0		0,576	182,264	
B2020	Furo 5B45	Furação em G1		0,944	183,208	
B2020	Recuo	Retorno em G0		0,156	183,364	
B2020	Posicionamento	Alinhamento com o proximo furo em G0		0,508	183,872	
B2020	Aproximação	Aproximação em G0		0,180	184,052	
B2020	Furo 5B49	Furação em G1		0,944	184,996	
B2020	Recuo	Retorno em G0		0,516	185,512	
B2020	Movimentação	Rotação da mesa A		1,676	187,188	Blow by
B2020	Aproximação	Aproximação em G0		0,424	187,612	
B2020	Furo 4B56	Furação em G1		0,944	188,556	
B2020	Recuo	Retorno em G0		0,156	188,712	
B2020	Acabado	Tempo total da Operação B2020	6,04	12,236	188,712	
	Troca de Ferramenta	B2020 para B2021	5,916		194,628	
B2021	Movimentação	Rotação da mesa A		1,636	196,264	Selo
B2021	Posicionamento inicial			0,684	196,948	
B2021	Aproximação	Aproximação em G0		0,420	197,368	
B2021	Face 5F49	Faceamento em G1		0,204	197,572	
B2021	Recuo	Retorno em G0		0,100	197,672	
B2021	Acabado	Tempo total da Operação B2021	5,916	3,044	197,672	
	Troca de Ferramenta	B2021 para B2023	6,008		203,680	
B2023	Posicionamento inicial	+ Rotação da mesa A		1,636	205,316	Blow by
B2023	Aproximação	Aproximação em G0		0,652	205,968	
B2023	Rosca Furo 4B56	Roscamento com L833		1,470	207,438	
B2023	Movimentação	Rotação da mesa A		1,680	209,118	Selo
B2023	Rosca Furo 5B47	Roscamento com L833		1,478	210,596	
B2023	Posicionamento	Alinhamento com o proximo furo em G0		0,532	211,128	
B2023	Rosca Furo 5B48	Roscamento com L833		1,002	212,130	
B2023	Posicionamento	Alinhamento com o proximo furo em G0		0,460	212,590	
B2023	Rosca Furo 5B46	Roscamento com L833		1,194	213,784	
B2023	Posicionamento	Alinhamento com o proximo furo em G0		0,576	214,360	
B2023	Rosca Furo 5B45	Roscamento com L833		1,050	215,410	
B2023	Posicionamento	Alinhamento com o proximo furo em G0		0,508	215,918	
B2023	Rosca Furo 5B49	Roscamento com L833		1,466	217,384	
B2023	Acabado	Tempo total da Operação B2023	6,008	13,704	217,384	
	Movimentação	Movimentacao para homepos		0,724	218,108	
	Troca de Ferramenta	B2023 para B2001	5,972		224,080	
		Fim da OP20			224,080	

Anexo 6 – Documentação Operação 30, Parte 1

OP 30		Bloco do Motor - 3 Cilindros				
Ferramenta	Operação	Especificação	Tempo de Troca de ferramenta [s]	Tempo de Operação (Em Vazio e em Corte) [s]	Tempo Acumulado [s]	Lado do bloco
	Troca	Inserir Primeira Ferramenta	2,696		2,696	
B3001	Posicionamento inicial	+ rotação da mesa A		1,648	4,344	Polia
B3001	Posicionamento	Alinhamento para aproximação G0		0,28	4,624	
B3001	Aproximação	Aproximação em G0		0,584	5,208	
B3001	Face 2F20	Faceamento abaixo		0,68	5,888	
B3001	Recuo	Retorno em G0		0,24	6,128	
B3001	Posicionamento	Alinhamento para aproximação G0		0,076	6,204	
B3001	Aproximação	Aproximação em G0		0,252	6,456	
B3001	Face 2F20	Faceamento acima		0,66	7,116	
B3001	Posicionamento	Alinhamento para Retorno G0		0,264	7,38	
B3001	Recuo	Retorno em G0		0,336	7,716	
B3001	Acabado	Tempo total da Operação B3001	2,696	5,02	7,716	
	Troca de Ferramenta	B3001 para B3002	2,248		9,964	
B3002	Posicionamento inicial	+ rotação da mesa A		1,648	11,612	Câmbio
B3002	Aproximação	Aproximação em G0		0,596	12,208	
B3002	Furo 2B4A/B	Início da Furação		0,86	13,068	
B3002	Furo 2B4A/B	Furação e rebaixo		1,44	14,508	
B3002	Recuo	Retorno em G0		0,184	14,692	
B3002	Acabado	Tempo total da Operação B3002	2,248	4,728	14,692	
B3003	Troca de Ferramenta	B3002 para B3003	2,404		17,096	
B3003	Posicionamento inicial			0,952	18,048	Câmbio
B3003	Posicionamento	Aproximação a partir da troca em G0		0,656	18,704	
B3003	Furo 2B5A/B	Início da Furação		2,004	20,708	
B3003	Furo 2B5A/B	Furação e rebaixo Mudança do Feed		1,22	21,928	
B3003	Recuo	Retorno em G0		0,184	22,112	
B3003	Acabado	Tempo total da Operação B3003	2,404	5,016	22,112	
	Troca de Ferramenta	B3003 para B3004	2,424		24,536	
B3004	Posicionamento inicial			0,952	25,488	Câmbio
B3004	Posicionamento	Alinhamento com o furo G0		0,612	26,1	
B3004	Furo 2B43	Início da Furação		0,94	27,04	
B3004	Furo 2B43	Furação e rebaixo com mudança do Feed		1,236	28,276	
B3004	Recuo	Retorno em G0		0,164	28,44	
B3004	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,468	28,908	
B3004	Furo 2B41	Início da Furação		0,94	29,848	
B3004	Furo 2B41	Furação e rebaixo com mudança do Feed		1,236	31,084	
B3004	Recuo	Retorno em G0		0,164	31,248	
B3004	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,472	31,72	
B3004	Furo 2B42	Início da Furação		0,94	32,66	
B3004	Furo 2B42	Furação e rebaixo com mudança do Feed		1,236	33,896	
B3004	Recuo	Retorno em G0		0,164	34,06	
B3004	Acabado	Tempo total da Operação B3004	2,424	9,524	34,06	
	Troca de Ferramenta	B3004 para B3006	2,384		36,444	
B3006	Posicionamento inicial			0,952	37,396	Câmbio
B3006	Posicionamento	Alinhamento com o furo G0		0,68	38,076	
B3006	Furo 2B20A	Furação e Chanfro		0,5	38,576	
B3006	Recuo	Retorno em G0		0,116	38,692	
B3006	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,492	39,184	
B3006	Furo 2B21A	Furação e Chanfro		0,5	39,684	
B3006	Recuo	Retorno em G0, para rotação da mesa		0,576	40,26	
B3006	Movimentação	Rotação da mesa A		1,648	41,908	Polia
B3006	Posicionamento	Alinhamento com o furo G0		0,62	42,528	
B3006	Furo 3B138A	Furação e Chanfro		0,528	43,056	
B3006	Recuo	Retorno em G0		0,104	43,16	
B3006	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,508	43,668	
B3006	Furo 3B139A	Furação e alargamento do furo		0,528	44,196	
B3006	Recuo	Retorno em G0		0,104	44,3	
B3006	Acabado	Tempo total da Operação B3006	2,384	7,856	44,3	
	Troca de Ferramenta	B3006 para B3008	2,48		46,78	
B3008	Posicionamento inicial			0,952	47,732	Polia
B3008	Posicionamento	Alinhamento com o primeiro furo G0		0,676	48,408	
B3008	Furo 3B162	Furação e alargamento do furo		1,268	49,676	
B3008	Recuo	Retorno em G0		0,152	49,828	
B3008	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,42	50,248	
B3008	Furo 3B151	Furação e alargamento do furo		1,268	51,516	
B3008	Recuo	Retorno em G0		0,152	51,668	
B3008	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,436	52,104	
B3008	Furo 3B163	Furação e alargamento do furo		1,268	53,372	
B3008	Recuo	Retorno em G0		0,152	53,524	
B3008	Acabado	Tempo total da Operação B3008	2,48	6,744	53,524	
	Troca de Ferramenta	B3008 para B3009	2,424		55,948	

Anexo 7 – Documentação Operação 30, Parte 2

OP 30		Bloco do Motor - 3 Cilindros				
Ferramenta	Operação	Especificação	Tempo de Troca de ferramenta [s]	Tempo de Operação (Em Vazio e em Corte) [s]	Tempo Acumulado [s]	Lado do bloco
	Troca de Ferramenta	B3009 para B3010	2,416		63,22	
B3010	Posicionamento inicial			0,952	64,172	Polia
B3010	Posicionamento	Alinhamento com o primeiro furo G0		0,728	64,9	
B3010	Furo 3B141	Alargamento		0,728	65,628	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,12	65,748	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,392	66,14	
B3010	Furo 3B142	Alargamento		0,728	66,868	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,12	66,988	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,3	67,288	
B3010	Furo 3B152	Alargamento		0,728	68,016	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,12	68,136	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,352	68,488	
B3010	Furo 3B143	Alargamento		0,728	69,216	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,12	69,336	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,388	69,724	
B3010	Furo 3B144	Alargamento		0,728	70,452	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,12	70,572	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,376	70,948	
B3010	Furo 3B153	Alargamento		0,728	71,676	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,12	71,796	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,38	72,176	
B3010	Furo 3B145	Alargamento		0,728	72,904	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,12	73,024	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,324	73,348	
B3010	Furo 3B146	Alargamento		0,728	74,076	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,512	74,588	
B3010	Movimentação	Rotação da mesa A		1,048	75,636	Carter
B3010	Posicionamento	Alinhamento com o primeiro furo G0		0,4	76,036	
B3010	Furo 6B160	Alargamento		0,664	76,7	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,204	76,904	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,376	77,28	
B3010	Aproximação	Aproximação do furo em G0		0,164	77,444	
B3010	Furo 6B162	Alargamento		0,728	78,172	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,12	78,292	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,368	78,66	
B3010	Furo 6B164	Alargamento		0,728	79,388	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,12	79,508	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,328	79,836	
B3010	Furo 6B166	Alargamento		0,728	80,564	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,12	80,684	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,336	81,02	
B3010	Furo 6B168	Alargamento		0,728	81,748	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,184	81,932	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,372	82,304	
B3010	Aproximação	Aproximação do furo em G0		0,144	82,448	
B3010	Furo 6B170	Alargamento		0,728	83,176	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,12	83,296	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,528	83,824	
B3010	Furo 6B171	Alargamento		0,728	84,552	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,184	84,736	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,36	85,096	
B3010	Aproximação	Aproximação do furo em G0		0,144	85,24	
B3010	Furo 6B169	Alargamento		0,728	85,968	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,12	86,088	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,368	86,456	
B3010	Furo 6B167	Alargamento		0,728	87,184	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,12	87,304	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,36	87,664	
B3010	Furo 6B165	Alargamento		0,728	88,392	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,12	88,512	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,324	88,836	
B3010	Furo 6B163	Alargamento		0,728	89,564	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,184	89,748	
B3010	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,38	90,128	
B3010	Aproximação	Aproximação do furo em G0		0,144	90,272	
B3010	Furo 6B161	Alargamento		0,664	90,936	
B3010	Recuo	Retorno em G0		0,184	91,12	
B3010	Acabado	Tempo total da Operação B3010	2,416	27,9	91,12	
	Troca de Ferramenta	B3010 para B3030	2,348		93,468	

Anexo 8 – Documentação Operação 30, Parte 3

OP 30		Bloco do Motor - 3 Cilindros					
Ferramenta	Operação	Especificação	Tempo de Troca de ferramenta [s]	Tempo de Operação (Em Vazio e em Corte) [s]	Tempo Acumulado [s]	Lado do bloco	
	Troca de Ferramenta	B3010 para B3030	2,348		93,468		
B3030	Posicionamento inicial			0,952	94,42	Carter	
B3030	Posicionamento	Alinhamento com o primeiro furo em G0		0,62	95,04		
B3030	Aproximação	Aproximação do furo em G64		0,152	95,192		
B3030	Furo 6B42/A	Furação com diferentes diâmetros		1,568	96,76		
B3030	Recuo	Retorno em G0		0,176	96,936		
B3030	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,396	97,332		
B3030	Furo 6B41/A	Aumento da Furação		1,568	98,9		
B3030	Recuo	Retorno em G0		0,176	99,076		
B3030	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,408	99,484		
B3030	Furo 6B43/A	Aumento da Furação		1,568	101,052		
B3030	Recuo	Retorno em G0		0,176	101,228		
B3030	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,396	101,624		
B3030	Furo 6B44/A	Aumento da Furação		1,568	103,192		
B3030	Recuo	Retorno em G0		0,176	103,368		
B3030	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,408	103,776		
B3030	Furo 6B46/A	Aumento da Furação		1,568	105,344		
B3030	Recuo	Retorno em G0		0,176	105,52		
B3030	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,396	105,916		
B3030	Furo 6B45/A	Aumento da Furação		1,568	107,484		
B3030	Recuo	Retorno em G0		0,176	107,66		
B3030	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,408	108,068		
B3030	Furo 6B47/A	Aumento da Furação		1,568	109,636		
B3030	Recuo	Retorno em G0		0,176	109,812		
B3030	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,396	110,208		
B3030	Furo 6B48/A	Aumento da Furação		1,568	111,776		
B3030	Recuo	Retorno em G0		0,176	111,952		
B3030	Acabado	Tempo total da Operação B3030	2,348	18,484	111,952		
	Troca de Ferramenta	B3030 para B3011	2,304		114,256		
B3011	Posicionamento inicial	+ rotação da mesa A		1,048	115,304	Câmbio	
B3011	Aproximação	Aproximação do furo em G0		0,68	115,984		
B3011	Furo 3B30	Furação e chanfro G1 G60		0,548	116,532		
B3011	Recuo	Retorno em G0 G64		0,116	116,648		
B3011	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G60		0,34	116,988		
B3011	Furo 3B31	Furação e chanfro G1 G60		0,548	117,536		
B3011	Recuo	Retorno em G0 G64		0,116	117,652		
B3011	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G60		0,408	118,06		
B3011	Furo 3B32	Furação e chanfro G1 G60		0,548	118,608		
B3011	Recuo	Retorno em G0 G64		0,116	118,724		
B3011	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G60		0,364	119,088		
B3011	Furo 3B33	Furação e chanfro G1 G60		0,548	119,636		
B3011	Recuo	Retorno em G0 G64		0,116	119,752		
B3011	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G60		0,412	120,164		
B3011	Furo 3B34	Furação e chanfro G1 G60		0,548	120,712		
B3011	Recuo	Retorno em G0 G64		0,116	120,828		
B3011	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G60		0,34	121,168		
B3011	Furo 3B35	Furação e chanfro G1 G60		0,548	121,716		
B3011	Recuo	Retorno em G0 G64		0,116	121,832		
B3011	Acabado	Tempo total da Operação B3011	2,304	7,576	121,832		
	Troca de Ferramenta	B3011 para B3012	2,444		124,276		
B3012	Posicionamento inicial	+ rotação da mesa A		0,952	125,228	Câmbio	
B3012	Posicionamento	Alinhamento com a face a ser furada G0		0,628	125,856		
B3012	Furo 2B50A	Furação com chanfro		1,016	126,872		
B3012	Recuo	Retorno em G0		0,108	126,98		
B3012	Acabado	Tempo total da Operação B3012	2,444	2,704	126,98		
	Troca de Ferramenta	B3012 para B3013	2,288		129,268		
B3013	Posicionamento inicial	+ rotação da mesa A		0,952	130,22	Câmbio	
B3013	Posicionamento	Alinhamento com o Furo		0,64	130,86		
B3013	Furo 2B50A	Alargamento do inicio do furo		0,316	131,176		
B3013	Recuo	Retorno em G0		0,084	131,26		
B3013	Acabado	Tempo total da Operação B3013	2,288	1,992	131,26		
	Troca de Ferramenta	B3013 para B3014	2,296		133,556		
B3014	Posicionamento inicial			0,952	134,508	Câmbio	
B3014	Alinhamento Inicial	Alinhamento em XYZ G60		0,588	135,096		
B3014	Posicionamento	Alinhamento com o primeiro mancal em G0		0,316	135,412		
B3014	Furo 6F46	Rasgo		1,084	136,496		
B3014	Recuo	Retorno em G0		0,092	136,588		
B3014	Posicionamento	Alinhamento com o próximo mancal G0		0,324	136,912		
B3014	Furo 6F47	Rasgo		1,084	137,996		
B3014	Recuo	Retorno em G0		0,092	138,088		
B3014	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,32	138,408		
B3014	Furo 6F48	Rasgo		1,084	139,492		
B3014	Recuo	Retorno em G0		0,092	139,584		
B3014	Recuo	Afastamento do Caiaque em G0		0,6	140,184		
B3014	Movimentação	Rotação da mesa A		1,648	141,832	Polia	
B3014	Posicionamento	Alinhamento com o furo em G0		0,624	142,456		
B3014	Furo 6F49	Rasgo		1,084	143,54		
B3014	Recuo	Retorno em G0		0,092	143,632		
B3014	Recuo	Afastamento do Bloco em G0		0,368	144		
B3014	Acabado	Tempo total da Operação B3014	2,296	10,444	144		
	Troca de Ferramenta	B3014 para B3015	2,244		146,244		

Anexo 9 – Documentação Operação 30, Parte 4

OP 30		Bloco do Motor - 3 Cilindros				
Ferramenta	Operação	Especificação	Tempo de Troca de ferramenta [s]	Tempo de Operação (Em Vazio e em Corte) [s]	Tempo Acumulado [s]	Lado do bloco
	Troca de Ferramenta	B3014 para B3015	2,244		146,244	
B3015	Posicionamento inicial	+ rotação da mesa A		1,048	147,292	Carter
B3015	Posicionamento	Alinhamento com a face a ser usinada G0		0,632	147,924	
B3015	Aproximação	Aproximação até a posição de usinagem G0		0,332	148,256	
B3015	Deslocamento Lateral	Deslocamento em G1		0,44	148,696	
B3015	Face 6F2-6F5-6F6	Faceamento		2,54	151,236	
B3015	Deslocamento Lateral	Deslocamento em G1		0,936	152,172	
B3015	Face 6F2-6F5-6F6	Faceamento		2,54	154,712	
B3015	Face 6F2-6F5-6F6	Faceamento		0,128	154,84	
B3015	Recuo	Retorno em G0		0,244	155,084	
B3015	Acabado	Tempo total da Operação B3015	2,244	8,84	155,084	
	Troca de Ferramenta	B3015 para B3016	2,396		157,48	
B3016	Posicionamento inicial	+ rotação da mesa A		1,048	158,528	Câmbio
B3016	Posicionamento	Alinhamento com a face a ser usinada G0		0,652	159,18	
B3016	Aproximação	Aproximação até a posição de usinagem G0		0,392	159,572	
B3016	Face 2F101-3F101	Faceamento com ferramenta composta G1		1,176	160,748	
B3016	Recuo	Retorno em G0		0,156	160,904	
B3016	Movimentação	Delocamento da ferramenta em Z em G0		0,076	160,98	
B3016	Face 2F101	Faceamento com a parte de trás da ferramenta composta G1		1,816	162,796	
B3016	Movimentação	Movimentação em G1 de ajuste		0,044	162,84	
B3016	Recuo	Retorno em G0		0,156	162,996	
B3016	Movimentação	Delocamento da ferramenta em Z em G0		0,088	163,084	
B3016	Face 3F101	Faceamento com ferramenta composta G1		1,816	164,9	
B3016	Movimentação	Movimentação em G1 de ajuste		0,044	164,944	
B3016	Recuo	Retorno em G0		0,156	165,1	
B3016	Recuo	Afastamento do Bloco em G0		0,308	165,408	
B3016	Acabado	Tempo total da Operação B3016	2,396	7,928	165,408	
	Troca de Ferramenta	B3016 para B3019	2,396		167,804	
B3019	Posicionamento inicial			0,952	168,756	Câmbio
B3019	Posicionamento	Alinhamento com a face a ser usinada G0		0,592	169,348	
B3019	Aproximação	Aproximação até a posição de usinagem G0		0,444	169,792	
B3019	Face 3F102	Faceamento		4,048	173,84	
B3019	Recuo	Retorno em G0		0,092	173,932	
B3019	Movimentação	Delocamento da ferramenta em Z em G0		0,38	174,312	
B3019	Face 2F102	Faceamento		4,048	178,36	
B3019	Recuo	Retorno em G0		0,092	178,452	
B3019	Recuo	Afastamento do Bloco em G0		0,568	179,02	
B3019	Acabado	Tempo total da Operação B3019	2,396	11,216	179,02	
	Troca de Ferramenta	B3019 para B3022	2,236		181,256	
B3022	Posicionamento inicial			0,952	182,208	Câmbio
B3022	Posicionamento	Alinhamento com o primeiro furo em G0		0,596	182,804	
B3022	Furo 2B4B	Roscamento usando função L833		2,102	184,906	
B3022	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,476	185,382	
B3022	Furo 2B43	Roscamento usando função L833		1,828	187,21	
B3022	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,544	187,754	
B3022	Furo 2B41	Roscamento usando função L833		1,832	189,586	
B3022	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,6	190,186	
B3022	Furo 2B42	Roscamento usando função L833		1,83	192,016	
B3022	Acabado	Tempo total da Operação B3022	2,236	10,76	192,016	
	Troca de Ferramenta	B3022 para B3023	2,616		194,632	
B3023	Posicionamento inicial			1,324	195,956	Câmbio
B3023	Posicionamento	Alinhamento com o primeiro furo em G0		0,744	196,7	
B3023	Furo 2B30	Roscamento usando função L833		0,798	197,498	
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,368	197,866	
B3023	Furo 2B31	Roscamento usando função L833		0,854	198,72	
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,456	199,176	
B3023	Furo 2B32	Roscamento usando função L833		0,854	200,03	
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,472	200,502	
B3023	Furo 2B33	Roscamento usando função L833		0,854	201,356	
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,468	201,824	
B3023	Furo 2B34	Roscamento usando função L833		0,854	202,678	
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,368	203,046	
B3023	Furo 2B35	Roscamento usando função L833 e recuo para rotação do caiaque		1,358	204,404	
B3023	Posicionamento	Rotação da mesa A		1,712	206,116	Polia
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,616	206,732	
B3023	Furo 2B153	Roscamento usando função L833		0,834	207,566	
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,484	208,05	
B3023	Furo 2B144	Roscamento usando função L833		0,834	208,884	
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,384	209,268	
B3023	Furo 2B145	Roscamento usando função L833		0,832	210,1	
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,352	210,452	
B3023	Furo 2B146	Roscamento usando função L833		0,834	211,286	
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,548	211,834	
B3023	Furo 2B143	Roscamento usando função L833		0,834	212,668	
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,452	213,12	
B3023	Furo 2B152	Roscamento usando função L833		0,834	213,954	
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,328	214,282	
B3023	Furo 2B142	Roscamento usando função L833		0,834	215,116	
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,432	215,548	
B3023	Furo 2B141	Roscamento usando função L833 e recuo para rotação do caiaque		1,23	216,778	
B3023	Posicionamento inicial	Rotação da mesa A		1,112	217,89	Carter

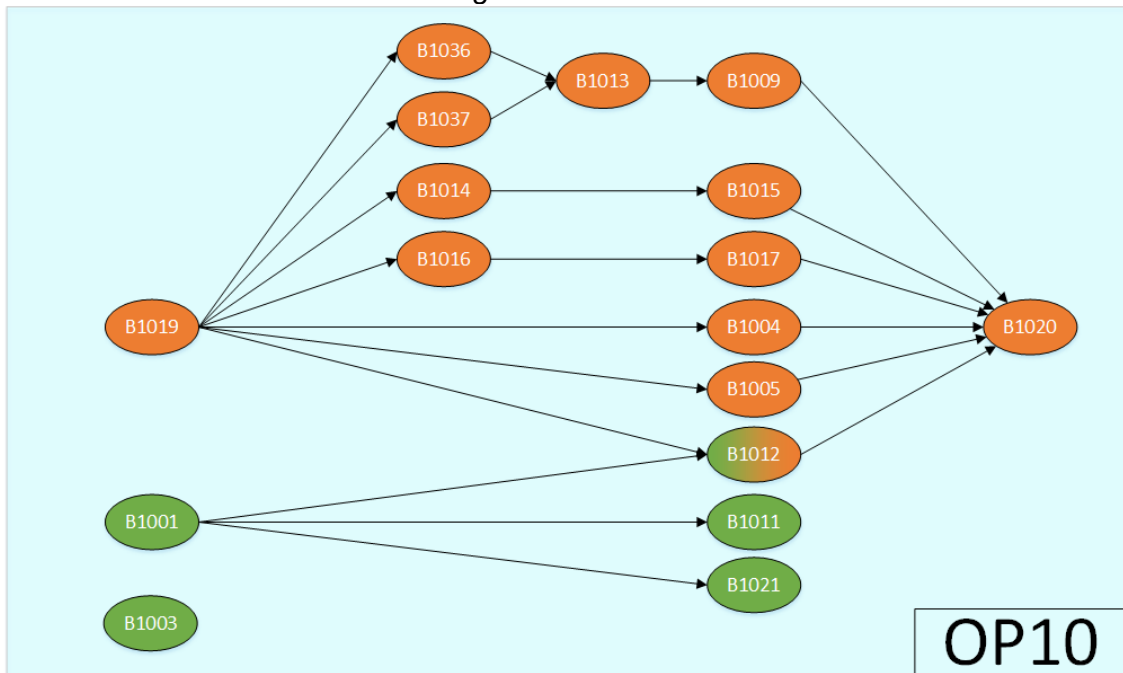
Anexo 10 – Documentação Operação 30, Parte 5

OP 30		Bloco do Motor - 3 Cilindros					
Ferramenta	Operação	Especificação	Tempo de Troca de ferramenta [s]	Tempo de Operação (Em Vazio e em Corte) [s]	Tempo Acumulado [s]	Lado do bloco	
B3023	Posicionamento inicial	Rotação da mesa A		1,112	217,89	Carter	
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,288	218,178		
B3023	Furo 6B171	Roscamento usando função L833		1,01	219,188		
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,384	219,572		
B3023	Furo 6B169	Aproximação em G0 e Roscamento usando função L833		1,042	220,614		
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,396	221,01		
B3023	Furo 6B167	Roscamento usando função L833		0,878	221,888		
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,388	222,276		
B3023	Furo 6B165	Roscamento usando função L833		0,878	223,154		
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,352	223,506		
B3023	Furo 6B163	Roscamento e recuo da fermenta usando função L833		1,01	224,516		
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,44	224,956		
B3023	Furo 6B161	Aproximação em G0 e Roscamento usando função L833		1,046	226,002		
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,632	226,634		
B3023	Furo 6B160	Roscamento e recuo da fermenta usando função L833		1,038	227,672		
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,428	228,1		
B3023	Furo 6B162	Aproximação em G0 e Roscamento usando função L833		1,046	229,146		
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,396	229,542		
B3023	Furo 6B164	Roscamento usando função L833		0,91	230,452		
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,356	230,808		
B3023	Furo 6B166	Roscamento usando função L833		0,91	231,718		
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,364	232,082		
B3023	Furo 6B168	Roscamento usando função L833		1,038	233,12		
B3023	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,4	233,52		
B3023	Furo 6B170	Roscamento usando função L833		1,174	234,694		
B3023	Recuo	Retorno em G0		0	234,694		
B3023	Acabado	Tempo total da Operação B3023	2,616	40,062	234,694		
	Troca de Ferramenta	B3023 para B3021	2,426		237,12		
B3021	Posicionamento inicial			1,324	238,444		Carter
B3021	Posicionamento inicial	Alinhamento com o furo em G0		0,652	239,096		
B3021	Furo 6B48/A	Roscamento usando função L833		2,03	241,126		
B3021	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,512	241,638		
B3021	Furo 6B47/A	Roscamento usando função L833		1,886	243,524		
B3021	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,432	243,956		
B3021	Furo 6B45/A	Roscamento usando função L833		1,886	245,842		
B3021	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,512	246,354		
B3021	Furo 6B46/A	Roscamento usando função L833		1,886	248,24		
B3021	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,432	248,672		
B3021	Furo 6B44/A	Roscamento usando função L833		1,886	250,558		
B3021	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,512	251,07		
B3021	Furo 6B43/A	Roscamento usando função L833		1,886	252,956		
B3021	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,436	253,392		
B3021	Furo 6B41/A	Roscamento usando função L833		1,886	255,278		
B3021	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,512	255,79		
B3021	Furo 6B42/A	Roscamento usando função L833 e recuo para rotação do caiaque		2,226	258,016		
B3021	Movimentação	Rotação da mesa A		1,112	259,128	Polia	
B3021	Movimentação	Alinhamento com o furo em G0		0,48	259,608		
B3021	Furo 3B162	Roscamento usando função L833		1,486	261,094		
B3021	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,464	261,558		
B3021	Furo 3B151	Roscamento usando função L833		1,486	263,044		
B3021	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,56	263,604		
B3021	Furo 3B163	Roscamento usando função L833		1,486	265,09		
B3021	Recuo	Retorno em G0		0	265,09		
B3021	Acabado	Tempo total da Operação B3021	2,426	27,97	265,09		
	Troca de Ferramenta	B3021 para B3007	2,636		267,726		
B3007	Posicionamento inicial			1,324	269,05		Polia
B3007	Aproximação	Aproximação do furo em G0		0,708	269,758		
B3007	Furo 3B147	Furação e chanfro G1 G60		0,852	270,61		
B3007	Recuo	Retorno em G0 G64		0,156	270,766		
B3007	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G60		0,356	271,122		
B3007	Furo 3B148	Furação e chanfro G1 G60		0,852	271,974		
B3007	Recuo	Retorno em G0 G64		0,156	272,13		
B3007	Acabado	Tempo total da Operação B3007	2,636	4,404	272,13		
	Troca de Ferramenta	B3007 para B3024	2,602		274,732		
B3024	Posicionamento inicial			1,324	276,056	Polia	
B3024	Posicionamento inicial	Alinhamento com o furo em G0		0,7	276,756		
B3024	Furo 3B147	Roscamento usando função L833		0,894	277,65		
B3024	Movimentação	Direcionamento para o próximo furo em G0		0,356	278,006		
B3024	Furo 3B148	Roscamento usando função L833		0,894	278,9		
B3024	Acabado	Tempo total da Operação B3024	2,602	4,168	278,9		
	Troca de Ferramenta	B3024 para B3025	2,596		281,496		

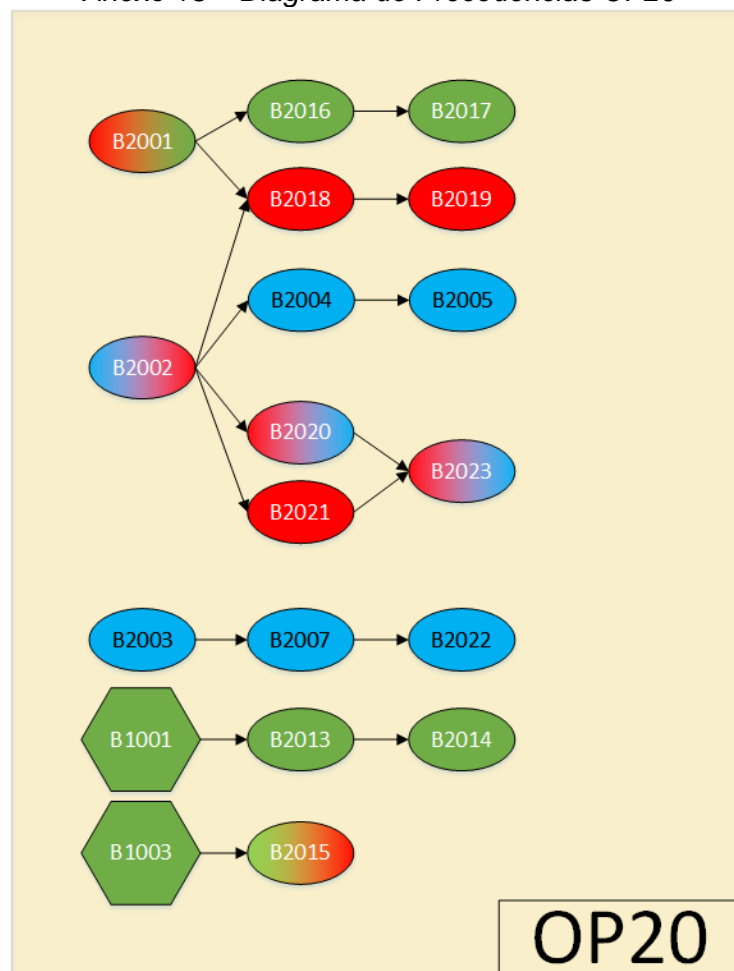
Anexo 11 – Documentação Operação 30, Parte 6

OP 30		Bloco do Motor - 3 Cilindros				
Ferramenta	Operação	Especificação	Tempo de Troca de ferramenta [s]	Tempo de Operação (Em Vazio e em Corte) [s]	Tempo Acumulado [s]	Lado do bloco
	Troca de Ferramenta	B3024 para B3025	2,596		281,496	
B3025	Posicionamento inicial			1,324	282,82	Polia
B3025	Posicionamento	Alinhamento com a face a ser usinada G0		0,644	283,464	
B3025	Face 3F4	Início do faceamento		0,644	284,108	
B3025	Face 3F4	Faceamento		0,992	285,1	
B3025	Face 3F4	Faceamento		0,236	285,336	
B3025	Face 3F4	Faceamento		0,308	285,644	
B3025	Face 3F4	Faceamento		1,044	286,688	
B3025	Face 3F4	Faceamento		1,716	288,404	
B3025	Face 3F4	Faceamento		0,464	288,868	
B3025	Face 3F4	Faceamento		0,696	289,564	
B3025	Face 3F4	Faceamento		0,388	289,952	
B3025	Face 3F4	Faceamento		0,416	290,368	
B3025	Face 3F4	Finalização do Faceamento		0,432	290,8	
B3025	Recuo	Retorno em G0		0,332	291,132	
B3025	Acabado	Tempo total da Operação B3025	2,596	9,636	291,132	
	Troca de Ferramenta	B3025 para B3026	2,428		293,56	
B3026	Posicionamento inicial	+ rotação da mesa A		1,712	295,272	Câmbio
B3026	Posicionamento	Alinhamento com a face a ser usinada G0		0,632	295,904	
B3026	Face 2F1	Início do faceamento G1		0,792	296,696	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G3		0,12	296,816	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G1		0,556	297,372	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G1		0,088	297,46	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G3		0,18	297,64	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G1		0,624	298,264	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G3		0,176	298,44	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G1		0,492	298,932	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G3		0,136	299,068	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G1		0,364	299,432	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G3		0,136	299,568	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G1		0,64	300,208	
B3026	Face 2F1	Movimentação em G0		0,412	300,62	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G1		0,548	301,168	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G2		0,16	301,328	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G1		0,188	301,516	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G2		0,112	301,628	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G1		0,212	301,84	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G2		0,172	302,012	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G1		0,228	302,24	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G2		0,176	302,416	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G1		0,24	302,656	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G2		0,176	302,832	
B3026	Face 2F1	Faceamento em G1		0,572	303,404	
B3026	Acabado	Tempo total da Operação B3026	2,428	9,844	303,404	
	Troca de Ferramenta	B3026 para B3028	2,676		306,08	
B3028	Posicionamento inicial			1,324	307,404	Câmbio
B3028	Posicionamento	Alinhamento com a face a ser usinada G0		0,78	308,184	
B3028	Face 2F1	Início do faceamento G1		0,116	308,3	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,784	309,084	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,368	309,452	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,264	309,716	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,876	310,592	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,936	311,528	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,444	311,972	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,628	312,6	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,628	313,228	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,468	313,696	
B3028	Face 2F1	Movimentação em G0		0,388	314,084	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,436	314,52	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,568	315,088	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,464	315,552	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,36	315,912	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,3	316,212	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,368	316,58	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,492	317,072	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,54	317,612	
B3028	Face 2F1	Faceamento em G1		0,448	318,06	
B3028	Recuo	Retorno em G0		0,564	318,624	
B3028	Movimentação	Rotação da mesa A		1,712	320,336	Polia
B3028	Posicionamento	Alinhamento com a face a ser usinada G0		0,696	321,032	
B3028	Face 3F3	Início do faceamento		0,372	321,404	
B3028	Face 3F3	Faceamento		0,708	322,112	
B3028	Face 3F3	Faceamento		0,408	322,52	
B3028	Face 3F3	Faceamento		0,892	323,412	
B3028	Face 3F3	Faceamento		1,364	324,776	
B3028	Face 3F3	Faceamento		0,388	325,164	
B3028	Face 3F3	Faceamento		0,364	325,528	
B3028	Face 3F3	Faceamento		0,352	325,88	
B3028	Face 3F3	Faceamento		0,452	326,332	
B3028	Face 3F3	Faceamento		0,488	326,82	
B3028	Face 3F3	Finalização do Faceamento		0,676	327,496	
B3028	Recuo	Retorno em G0		0,772	328,268	
B3028	Acabado	Tempo total da Operação B3028	2,676	22,188	328,268	
	Troca de Ferramenta	B3028 para primeira Ferramenta	2,676		330,944	
		Fim da OP30			330,944	

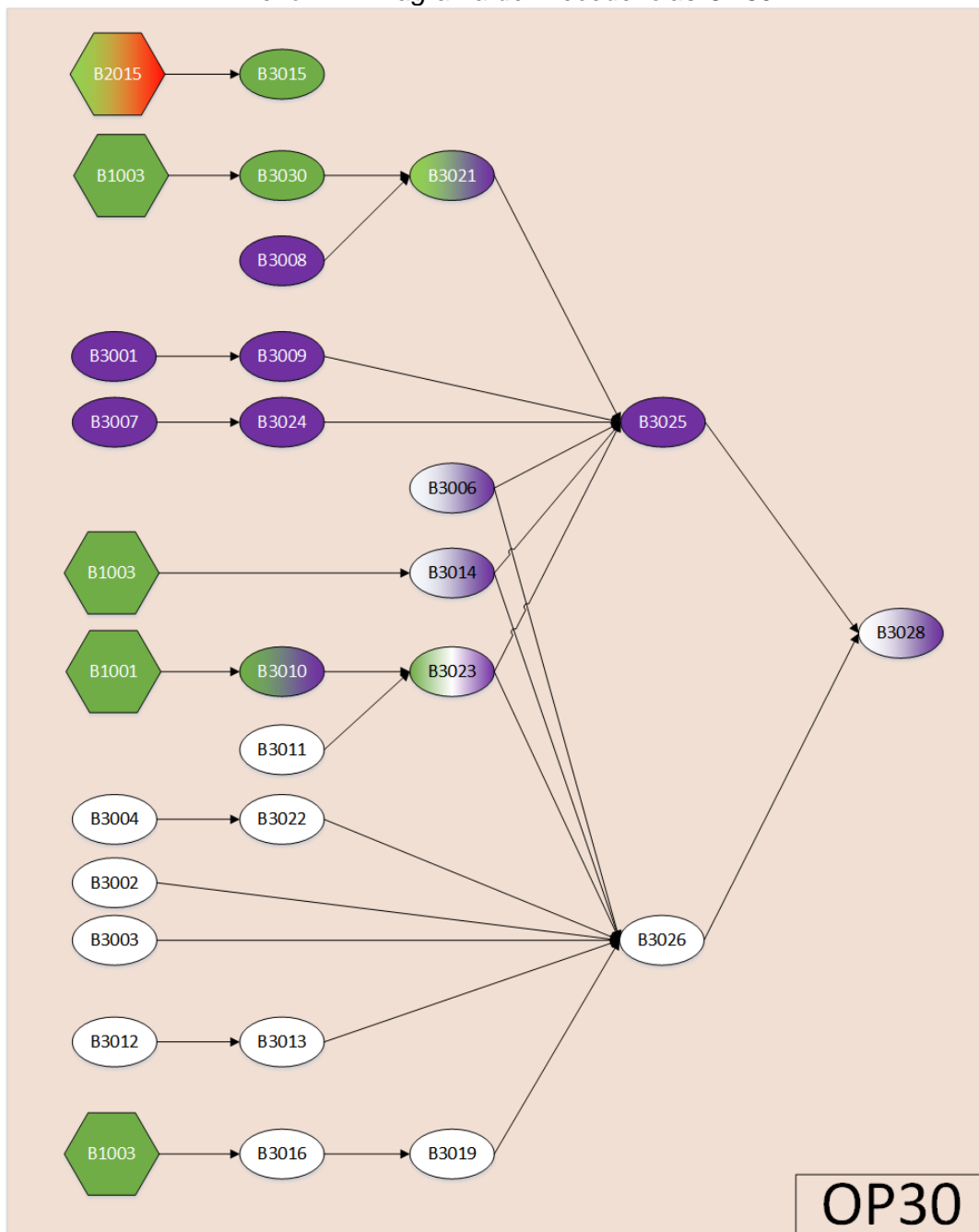
Anexo 12 – Diagrama de Precedências OP10



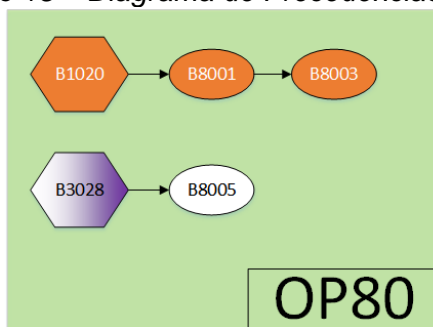
Anexo 13 – Diagrama de Precedências OP20



Anexo 14 – Diagrama de Precedências OP30



Anexo 15 – Diagrama de Precedências OP80



Anexo 16 – Legenda de cores dos Diagramas de Precedência

Legenda das Cores	
 B3015	- Carter
 B3024	- Polia
 B3002	- Cambio
 B2019	- Selo
 B2005	- Blow-by
 B1013	-Cabecote