

LUIZ ALEXANDRE SARTO MALATESTA

A TÉCNICA DE KAIZEN E MODELAGEM DISCRETA APLICADAS A
SISTEMAS PRODUTIVOS

São Paulo
2010

LUIZ ALEXANDRE SARTO MALATESTA

A TÉCNICA DE KAIZEN E MODELAGEM DISCRETA APLICADAS A
SISTEMAS PRODUTIVOS

Monografia do Trabalho de Formatura
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo como requisito
parcial para a graduação em engenharia

Área de concentração:
Engenharia Mecatrônica e de Sistemas
Mecânicos

Orientador:
Prof. Dr. Diolino José Santos Filho

São Paulo
2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Malatesta, Luiz

A técnica de Kaizen e modelagem discreta aplicadas a sistemas produtivos / L. Malatesta. -- São Paulo, 2011.
p. 84

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Sistemas de produção 2. Manufatura enxuta I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Diolino José Santos Filho, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

A toda equipe de engenharia de manufatura da General Motors do Brasil, pelas entrevistas e informações fornecidas.

Aos amigos, familiares e à Soraya, pelo apoio e incentivo e a todos que colaboraram direta ou indiretamente, na execução deste trabalho.

RESUMO

Hoje, as grandes montadoras deparam-se com a necessidade de um método adequado de aplicação da técnica de Kaizen, para que seja possível a implementação de melhorias contínuas na linha de produção e que podem depender de um estudo específico, uma vez que a presença de tais deficiências pode dificultar o atendimento das necessidades de produção e, consequentemente, impactar negativamente no custo de produção. O objetivo é provocar uma integração entre o chão de fábrica e a engenharia para que seja possível potencializar os resultados obtidos a partir da técnica de Kaizen. Sendo assim, o presente projeto pretende aplicar técnicas de modelagem de processos de fabricação para representarem as operações de funilaria que são realizadas para a produção dos veículos automotivos. A partir da análise do sistema em questão, deseja-se elaborar um modelo de processo adequado as necessidades, que permita ao responsável pela produção realizar dois tipos de análise: qualitativa e quantitativa. A análise qualitativa identifica problemas de travamento no sistema devido às falhas no sistema de controle de utilização dos recursos para execução das atividades do processo. Por sua vez, a análise quantitativa indica a necessidade de ajustes na sincronização e disponibilidade de recursos, de acordo com a demanda de produção. O modelo será desenvolvido em simuladores baseados em modelos de filas e eventos discretos e deverá ser uma ferramenta fundamental para eliminar as causas de travamento e identificar gargalos que devem ser eliminados para aumento da produtividade ou balanceamento do sistema produtivo que deverá impactar na validação de propostas para melhorias.

Palavras chave: Sistemas de produção, Modelagem de processos produtivos, Técnica de Kaizen, Sistemas a Eventos Discretos, Manufatura enxuta.

ABSTRACT

Nowadays, the main automakers are faced with the need for an appropriate method of applying the technique of kaizen to implement continuous improvements in the production line and they can depend on a specific study, once the presence of such deficiencies may hinder meeting the needs of production and, consequently, negatively impact the production cost. The aim is to provoke an integration between shop-floor workers and engineering to be able to leverage the results from the technique of Kaizen. Thus, this project aims to apply techniques for modeling of manufacturing processes to represent the body shop operations that are performed for the production of automotive vehicles. From the analysis of the system in question, we want to build a model of due process requirements, which allows the person responsible for the production perform two types of analysis: qualitative and quantitative. The qualitative analysis identifies problems locking in the system due to faults in the control system resource utilization for execution of process activities. In turn, the quantitative analysis indicates the need for adjustments in the timing and availability of resources, according to production demand. The model will be developed based on simulation models of queuing and discrete event and should be a fundamental tool to eliminate the causes of crashes and identify points with the longest production cycle that must be eliminated to increase productivity or balancing of the production system that will impact the validation of proposals for improvements.

Keywords: Production systems, Modeling Processes, Kaizen technique, Discrete Event Systems, Lean Manufacturing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Metodologia - Processo Iterativo.....	16
Figura 2 - Exemplo de uma célula produtiva de compartimento do motor	34
Figura 3 - Método 1 - Realidade atual	35
Figura 4 - PFS do primeiro método: foco no operador.....	36
Figura 5 - Método 2: Quebra do paradigma. Foco no Processo	38
Figura 6 - Detalhamento do Segundo Método.....	38
Figura 7 - PFS do segundo método: quebra do paradigma	40
Figura 8 - PFS Nível 1 – Exemplo	40
Figura 9 - PFS Nível 2 – Exemplo	41
Figura 10 - PFS Nível 3 – Exemplo	41
Figura 11 - PFS Nível 4 – Exemplo	42
Figura 12 - MFG - Fixa Peças – Exemplo	43
Figura 13 - MFG - Solda Peças – Exemplo	44
Figura 14 - Modelo Final em Rede de Petri do terceiro método - Exemplo.....	45
Figura 15 - Exemplo de Aplicação - Fluxograma das células produtivas	46
Figura 16 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Dianteiro	48
Figura 17 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Traseiro	49
Figura 18 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo Partes A e B	50
Figura 19 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo Partes C, D, E e F	50
Figura 20 - Exemplo de Aplicação - Painéis Laterais	51
Figura 21 - Exemplo de Aplicação - Teto	52
Figura 22 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS para Assoalho Dianteiro	53
Figura 23 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Dianteiro - Parte A - Fixa Peças.....	54
Figura 24 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Dianteiro - Parte B - Fixa Peças.....	54
Figura 25 - Exemplo de Aplicação – Grafo MFG – Assoalho Dianteiro – Parte A – Fixa Peças	55

Figura 26 - Exemplo de Aplicação – Grafo MFG – Assoalho Dianteiro – Parte A – Solda Peças.....	55
Figura 27 - Exemplo de Aplicação – Grafo MFG – Assoalho Dianteiro – Parte B – Fixa Peças	56
Figura 28 - Exemplo de Aplicação – Grafo MFG – Assoalho Dianteiro – Parte B – Solda Peças.....	57
Figura 29 - Exemplo de Aplicação – Grafo MFG – Assoalho Dianteiro – Parte B – Transporta Conjunto	57
Figura 30 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Dianteiro - Modelo Final	58
Figura 31 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Traseiro	59
Figura 32 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Traseiro - Fixa Peças....	59
Figura 33 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Traseiro - Fixa Peças...60	60
Figura 34 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Traseiro - Solda Peças 61	61
Figura 35 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Traseiro - Modelo Final.....	61
Figura 36 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo	62
Figura 37 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte A	62
Figura 38 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte A - Fixa Peças.....	63
Figura 39 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte A - Fixa Peças.....	63
Figura 40 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo - Parte A - Modelo Final....	64
Figura 41 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte B	64
Figura 42 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte B - Posiciona Peças	65
Figura 43 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte B - Posiciona Peças	65
Figura 44 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte B - Solda Peças.....	66
Figura 45 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte B - Posiciona Peças 2	66
Figura 46 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo - Parte B - Modelo Final....	67
Figura 47 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte C.....	67
Figura 48 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte C - Posiciona Peças	67

Figura 49 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte C - Solda Peças.....	68
Figura 50 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte C - Retira Dispositivo	68
Figura 51 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo - Parte C - Modelo Final ...	69
Figura 52 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte D	69
Figura 53 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte D	69
Figura 54 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo - Parte D - Modelo Final ...	70
Figura 55 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte E	70
Figura 56 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte E	71
Figura 57 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo - Parte E - Modelo Final....	71
Figura 58 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte F	72
Figura 59 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte F	72
Figura 60 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo - Parte F - Modelo Final....	73
Figura 61 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Painéis Laterais.....	73
Figura 62 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Painéis Laterais - Parte A.....	73
Figura 63 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Painéis Laterais - Parte A.....	74
Figura 64 - Exemplo de Aplicação - Painéis Laterais - Parte A - Modelo Final	74
Figura 65 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Painéis Laterais - Parte B.....	74
Figura 66 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Painéis Laterais - Parte B - Fixa Peças.....	75
Figura 67 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Painéis Laterais - Parte B - Transporta Peças.....	75
Figura 68 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Painéis Laterais - Parte B - Fixa Peças.....	76
Figura 69 - Exemplo de Aplicação - Painéis Laterais - Parte B - Modelo Final	76
Figura 70 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS – Estrutura.....	76
Figura 71 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG – Estrutura.....	77
Figura 72 - Exemplo de Aplicação - Estrutura - Modelo Final.....	77
Figura 73 - Exemplo de Aplicação – Grafo PFS – Teto.....	77
Figura 74 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Teto - Parte A.....	78
Figura 75 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Teto - Parte A - Transporta Peças	78
Figura 76 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Teto - Parte A - Painel do Teto....	78

Figura 77 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Teto - Parte A - Caixa de Roda ..	79
Figura 78 - Exemplo de Aplicação - Teto - Parte A - Modelo Final	79
Figura 79 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Teto - Parte B.....	79
Figura 80 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Teto - Parte B - Transporta Peças	80
Figura 81 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Teto - Parte B - Solda Peças.....	80
Figura 82 - Exemplo de Aplicação - Teto - Parte B - Modelo Final	81
Figura 83 - Exemplo de Aplicação - Modelo Final	81

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Motivação.....	13
1.2	Objetivo.....	14
1.3	Justificativa	15
1.4	Organização do trabalho	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Sistemas produtivos.....	17
2.1.1	Classificações dos sistemas	17
2.1.2	Sistemas produtivos antropocêntricos	19
2.1.3	Flexibilidade	21
2.1.4	Sistemas Produtivos Flexíveis	22
2.1.5	Sistemas de Produção Enxuta (<i>Lean Manufacturing Systems</i>).....	23
2.2	Modelagem de sistemas produtivos	24
2.2.1	Redes de Petri.....	24
2.2.2	Redes Elementares	25
2.2.3	PFS (Production Flow System).....	26
2.2.4	MFG (Mark Flow Graph)	27
2.2.5	Ambiente Computacional baseado em Rede de Petri.....	29
2.3	A técnica Kaizen	29
2.3.1	Ciclo PDCA	30
3	PROPOSTAS DE MÉTODOS DE INTERAÇÃO COM O KAIZEN.....	33
3.1	Método 1 – Realidade atual	34
3.2	Método 2 – Quebra de paradigma.....	36

3.3	Método 3 – Eliminação das restrições fictícias	39
3.4	Procedimento para aplicação do método	45
4	EXEMPLO DE APLICAÇÃO	46
4.1	Descrição	46
4.2	Composição	47
4.2.1	Assoalho Dianteiro	47
4.2.2	Assoalho Traseiro	47
4.2.3	Assoalho Completo	48
4.2.4	Painéis Laterais	49
4.2.5	Estruturação	50
4.2.6	Teto	51
4.3	Passo a passo da aplicação do método	52
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	82
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

1 INTRODUÇÃO

A história demonstra que grandes evoluções nos sistemas produtivos surgiram na manufatura de veículos automotivos. Os principais conceitos abordados neste trabalho baseados em produção enxuta e técnica Kaizen, além de outras metodologias como entrega no tempo exato (*just in time*), sistemas de manufatura puxada com a utilização de cartões (Kanbans) e sistemas a prova de erros (Pokayokes), tiveram seu desenvolvimento e primeira aplicação no Sistema de Produção Toyota em meados do século XX (LIKER, 2005; PANIAGO, 2008; WOMACK; JONES; ROOS, 2004). Os resultados da manufatura enxuta eram nitidamente vantajosos em relação à produção em massa e isto fez com que houvesse a adoção da manufatura enxuta pelas empresas ocidentais, mas que, até os anos 90, esteve limitada a indústria automotiva. As ferramentas desenvolvidas tiveram tanto sucesso na evolução da produção que, após 1990, houve uma migração de trabalhos para fora do chão de fábrica obtendo grande sucesso em empresas ocidentais de diversos setores e negócios (PANIAGO, 2008). Womack; Jones e Ross (2004) afirmam que os problemas de manufatura e tecnologia são problemas universais frente à gestão de negócios em geral.

Diante deste contexto, este trabalho é um estudo da integração de duas abordagens importantes na atualidade da manufatura, a modelagem discreta e a técnica Kaizen, e utilizará a manufatura de veículos automotivos como base para o estudo e análise dos conceitos desenvolvidos.

1.1 Motivação

Forçadas pelo dinamismo do mercado e a crescente concorrência com a introdução de novos competidores, as grandes montadoras deparam-se com a necessidade de uma implementação dinâmica e eficaz de melhorias em suas linhas de produção. No Brasil, a manufatura de veículos automotivos ainda é marcada por forte presença humana em suas operações, o que podemos denominar de sistemas

antropocêntricos (KOVACS; MONIZ, 1995). Estes sistemas são caracterizados pela alta complexidade de representação de suas operações e diferentes fluxos de processos envolvendo a autonomia do operador no sistema modelado. No caso de um sistema semi-automático, surge o desafio de criar um modelo capaz de representar a interação entre os agentes e que seja capaz de:

- Otimizar a produção das máquinas
- Otimizar a produção dos operadores
- Modelar a autonomia do operador

A metodologia atualmente empregada na modelagem do sistema apresenta algumas limitações:

- Dificuldade de análise de problemas de sincronização de uso dos recursos;
- Dificuldade de controle dos gargalos envolvendo operadores humanos e;
- Impossibilidade de análise de propostas efetivas de melhorias no fluxo do processo que contemplem estes graus de liberdade em seu comportamento dinâmico.

Podemos identificar dificuldades na análise de problemas de travamento devido a falhas no sistema de controle de utilização dos recursos e a necessidade de ajustes na disponibilidade de recursos, de acordo com a demanda de produção desejada: envolver o operador humano em seqüenciamentos pré-definidos pode gerar restrições artificiais desnecessárias para a execução do processo produtivo. Um novo método de modelagem deve, portanto, ser empregado para viabilizar a eliminação das causas de travamento e a identificação de gargalos que devem ser eliminados para o aumento da produtividade e/ou o balanceamento do sistema produtivo que deverá impactar na verificação e validação de propostas para melhorias.

1.2 Objetivo

O presente trabalho visa elaborar um método de modelagem que seja adequado às atuais necessidades de análises e simulações para identificação, validação e implementação de propostas de melhorias, advindas da aplicação da técnica Kaizen na manufatura de veículos automotivos.

O método consistirá em estabelecer um conjunto de procedimentos para se identificar o processo real, isto é, sem as restrições fictícias provavelmente geradas por modelos inadequados ao contexto requerido. A partir deste modelo poderá ser possível analisar os pontos que causam ociosidade, aproveitando melhor a força de trabalho disponível, além do diagnóstico das causas de *downtime* (tempo de parada) e da resposta do sistema à ocorrência de falhas na linha de produção, representando a autonomia dos operadores quando for o caso de processos semi-automáticos.

1.3 Justificativa

Os modelos desenvolvidos em redes de Petri propostos vão permitir análises sem que haja a necessidade de alteração nas linhas de produção para daí avaliar-se as possíveis alterações em termos de índices de produtividade.

Neste contexto, este trabalho procura contribuir para a definição de um ambiente de condicionamento virtual para suportar as propostas oriundas da aplicação da técnica Kaizen. Este ambiente irá tornar ágil o processo de aprimoramento contínuo dos sistemas produtivos, uma vez que os resultados poderão ser avaliados em ambiente virtual.

1.4 Organização do trabalho

Para este trabalho são utilizadas ferramentas baseadas nos conceitos de modelagem discreta para a representação dos processos produtivos e a realização dos procedimentos de análise que constituem o método desejado.

A primeira fase do projeto consiste em levantar dados quanto à composição da uma linha de produção de veículos automotivos, processos executados e principalmente sobre o modelo atualmente utilizado. Após o estudo do sistema, é necessário um estudo aprofundado das atuais técnicas de modelagem de sistemas a eventos discretos para a sua correta aplicação, bem como o conhecimento do software *HPSim*, onde será desenvolvido o modelo final desde projeto, estando apto para análises através da simulação. Estas três fases estão interligadas através de um processo iterativo de desenvolvimento do método (Figura 1).

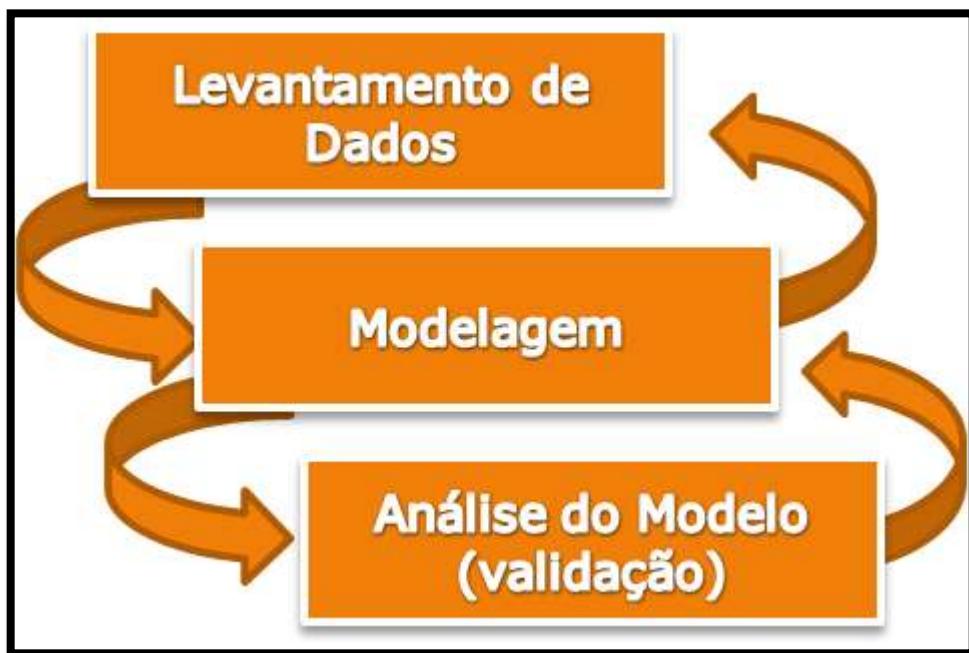


Figura 1 - Metodologia - Processo Iterativo

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas produtivos

Podemos definir um Sistema Produtivo (SP) como uma coleção de pessoas, equipamentos e procedimentos organizados para realizar as operações de manufatura de uma companhia sendo formados por duas partes principais: instalações e sistema de suporte à produção (GROOVER, 2007).

As instalações são caracterizadas pelos equipamentos e layout da planta, ou seja, a parte estrutural do sistema como equipamentos de manuseio e transporte de materiais, contemplando ainda a forma como estão organizados.

O sistema de suporte à produção consiste no planejamento e gerenciamento da produção, ou seja, um conjunto de procedimentos adotados como forma de gerenciar a produção sanando problemas técnicos e logísticos que são encontrados em requisição e movimentação de materiais assegurando-se, desta forma, que os produtos estarão dentro dos padrões de qualidade. Este sistema contempla ainda as estratégias de negócios e o projeto de produtos.

2.1.1 Classificações dos sistemas

Com o objetivo de especificar a classe de sistemas abordada neste trabalho, apresentamos a seguir a estruturação apresentada em Cassandras e Lafortune (2007) para estabelecer as diretrizes:

- Sistemas Instantâneos e Dinâmicos. Nos sistemas instantâneos ou estáticos os valores das saídas são normalmente independentes dos valores anteriores das correspondentes entradas. Nos sistemas dinâmicos, os valores das saídas dependem dos valores das entradas e os valores anteriores das entradas em um determinado instante;

- Sistemas Variantes e Invariantes no Tempo. O comportamento de um sistema Invariante no Tempo gera a mesma resposta para determinada entrada independe do tempo. Se não houver esta independência, o sistema será Variante no Tempo;
- Sistemas Lineares e Não-Lineares. Um sistema linear satisfaz a condição $g(a_1u_1 + a_2u_2) = a_1g(u_1) + a_2g(u_2)$, onde u_1 e u_2 são dois vetores de entrada, a_1 e a_2 são números reais e $g(\cdot)$ é a função de saída resultante, isto é, o sinal de saída mediante um valor de entrada do sistema. Caso esta condição seja falsa, o sistema será não-linear. Na realidade, todos os sistemas são não-lineares, contudo, nos casos em que a faixa de variação dos sinais for suficientemente pequena, pode-se considerar esse sistema como sendo linear por aproximação;
- Sistema de Estado Contínuo e Estado Discreto. Em sistemas de estado contínuo, as variáveis de estado podem assumir valores reais. Em sistema de estado discreto as variáveis pertencem ao domínio dos inteiros não negativos;
- Sistemas Dirigidos pelo Tempo e Dirigidos por Eventos. Em sistemas dirigidos pelo tempo os estados do sistema mudam continuamente ao longo do tempo. Em sistemas dirigidos por eventos, somente a ocorrência assíncrona de eventos discretos causam uma mudança de estado de forma instantânea. O estado do sistema entre eventos consecutivos permanece inalterado;
- Sistemas Estocásticos e Determinísticos. Um sistema é estocástico quando a saída é uma variável aleatória, isto é, o comportamento do sistema é baseado em estatísticas. Se não houver uma saída aleatória, o sistema será determinístico;
- Sistemas de Tempo Discreto e Tempo Contínuo. Um sistema de tempo contínuo é onde todas as variáveis de entrada, variáveis de saída e as variáveis de estados são definidas para todos os possíveis valores de tempo. No sistema de tempo discreto, uma ou mais dessas variáveis são definidas em pontos discretos no tempo, isto é, aplica-se o conceito de amostragem de variáveis no tempo.

Baseado nas definições acima, e, considerando o fato do sistema abordado neste trabalho ser de manufatura de veículos automotivos, observa-se que este sistema apresenta as seguintes características:

- Sistema Dinâmico e Invariante no Tempo: os modelos de veículos produzidos, assim como o volume de produção são diretamente dependentes das variáveis de entrada, quantidade e modelo das peças.
- Não-Linear: O sistema de produção de veículos é demasiadamente complexo. Na prática a variação das entradas é considerável e não se pode aproximar para um sistema linear.
- Estado Discreto: Os estados são definidos por variáveis discretas, por exemplo: a presença ou não de determinada peça ou ferramenta e a realização ou não de determinada tarefa.
- Dirigido por Eventos: Na produção seriada automotiva, os pré-requisitos para a realização de uma tarefa envolvem basicamente a disponibilidade de recursos (peças, máquinas e ferramentas) e a finalização da tarefa precedente na cadeia de processo, ou seja, os responsáveis pela mudança de estado no sistema são a observância de condições e a ocorrência de eventos e não o tempo.
- Estocásticos: Novamente devido à complexidade do sistema de produção automotiva, os resultados de produção variam a cada dia e para o estudo do comportamento do sistema deve ser baseado em estatísticas.

Com essas características, podemos tratar nosso objeto de estudo como um Sistema a Eventos Discretos (SED). Ainda neste capítulo, vamos classificar nosso sistema como antropocêntrico e flexível, assim podemos tratar sua complexidade.

2.1.2 Sistemas produtivos antropocêntricos

A forte presença de funcionários de chão de fábrica na manufatura de veículos automotivos indica a necessidade de uma abordagem adequada para o desenvolvimento do modelo que represente a real autonomia e possibilidades de atuação do operador, desta forma, procura-se contemplar o melhor aproveitamento da mão de obra humana. A alocação de um operador humano para realização de

tarefas repetitivas subutiliza o potencial humano de autonomia, criatividade e iniciativa.

Em KOVACS; MONIZ (1995) tem-se uma abordagem que descreve o processo produtivo antropocêntrico como aquele em que a tecnologia é uma ferramenta de auxílio ao homem para a realização de atividades que constituem o processo. Essa abordagem é contrária à visão tecnocêntrica e suas diferenças são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Diferenças entre as abordagens antropocêntrica e tecnocêntrica, segundo KOVACS; MONIZ (1995).

Abordagem Antropocêntrica	Abordagem Tecnocêntrica
Introdução de novas tecnologias como complemento para capacidades humanas específicas, com o objetivo de aumentar a flexibilidade funcional, a qualidade dos produtos e a vida produtiva.	Introdução de novas tecnologias tendo em vista a redução da participação humana no chão de fábrica e dos custos de mão-de-obra.
Melhoria da qualidade e da estabilidade dos recursos humanos em todos os níveis, para melhorar a exploração de todos os potenciais oferecidos pela nova tecnologia.	Substituições das habilidades pela tecnologia, levando à redução da capacitação e a queda da motivação dos funcionários de chão de fábrica.
Soluções técnicas descentralizadas.	Soluções técnicas centralizadas.
Práticas de trabalho flexíveis baseadas em princípios como descentralização, multifuncionalidade, integração de tarefas, participação e cooperação.	Práticas de trabalho rígidas, baseadas em princípios como centralização, separação horizontal e vertical de tarefas e especialização de competência.
Limites flexíveis.	Hierarquia rígida e limitações profissionais.
Novo profissionalismo a nível operacional: autonomia para efetuar tarefas diferentes e complexas, capacidade para resolução de problemas, criatividade e autonomia individual ou em grupo.	Participação passiva a nível operacional: execução de tarefas simples.
Integração de partes de empresas através de treinamento, socialização, comunicação, cooperação e acesso fácil a informações, participação na tomada de decisões e autonomia.	Integração de unidades de empresas através de centralização computadorizada de informações, fácil a informações, participação na decisões e controle.

2.1.3 Flexibilidade

Em sistemas complexos onde existe a execução de múltiplas tarefas utilizando o mesmo recurso, é interessante analisar o conceito de flexibilidade lógica do sistema. Groover (2007) define o termo flexibilidade como sendo um atributo do sistema de manufatura responsável pela capacidade de lidar com certo nível de variação entre os processos podendo realizar comutações de atividades dos processos sem interrupções na produção. Para este trabalho vamos considerar o conceito de flexibilidade definido em Santos Filho (2000) como sendo a capacidade de um determinado sistema de adaptar-se a diferentes dinâmicas de seus processos, considerando diferentes abrangências, isto é:

- i. Capacidade de processar diferentes elementos;
- ii. Capacidade de gerenciar fluxos alternativos para movimentação dos elementos no sistema;
- iii. Capacidade de alocação dinâmica das estações de trabalho para conduzir a execução de diferentes processos segundo rotas alternativas;
- iv. Capacidade de manutenção e atualização das funções do sistema computacional.

Neste contexto e de acordo com Morales (2009), podemos definir alguns tipos de flexibilidade:

- Flexibilidade de produto, que é a capacidade do sistema de manufatura modificar-se para produzir um novo conjunto de itens, de forma rápida e econômica;
- Flexibilidade de processo, que é a capacidade de produzir um item de várias maneiras;
- Flexibilidade de operação, que é a capacidade de reordenar as operações do sistema de manufatura num processo produtivo de um item.

Portanto, observa-se que a flexibilidade pode ser considerada como um elemento importante na controle e atualizações no ambiente operacional, permitindo desse modo, respostas adaptativas a situações imprevisíveis ou raras.

2.1.4 Sistemas Produtivos Flexíveis

Apesar de todo o interesse nos sistemas produtivos flexíveis (SPFs), não há uma definição consensual do termo. O principal conceito que rege o SPF é o termo flexibilidade, que, como podemos perceber no item anterior, não possui uma definição única e precisa. Logo, vamos utilizar as definições que mais se aproximam ao objetivo deste trabalho, como em Santos Filho (2000), onde poderemos definir um SPF como um agrupamento de postos de trabalho para prestação de serviços interligados por uma lógica de movimentação baseada em processos, onde cada etapa do processo pode ser interpretada como :

- Ação ou conjunto de ações que transformam o estado do elemento, ou;
- Prestação de um serviço a este elemento e que implica também em alterar o estado do elemento que está recebendo este serviço.

O sistema produtivo flexível pode ser concebido como um conjunto de subsistemas distribuídos cujo controle, em geral, pode ser descrito segundo uma hierarquia que depende da quantidade de equipamentos, layout de fábrica, filosofia de gerenciamento, disponibilidade de software e equipamentos computadorizados, grau de automação, entre outros aspectos.

Neste trabalho, iremos abordar sistemas flexíveis de manufatura como uma classe de SPF com forte interação homem-máquina, onde o operador humano exerce mais de uma operação por ciclo.

De acordo com as definições de flexibilidade no item anterior e com a análise do objeto em estudo, podemos notar que nosso sistema terá um foco maior na flexibilidade de operação. Isto ocorre justamente pela forte presença humana na cadeia produtiva das linhas de produção automotivas no Brasil. Este tipo de

flexibilidade é de interesse para este trabalho, pois, possui uma forte presença de procedimentos baseados na técnica Kaizen para aprimoramento contínuo.

2.1.5 Sistemas de Produção Enxuta (*Lean Manufacturing Systems*)

Este conceito de produção teve seu início no Japão e, atualmente, encontramos sua aplicação nos principais pólos de manufatura mundial, principalmente na indústria automobilística. O termo *Lean Manufacturing* indica uma produção “enxuta”, “na medida certa” ou “desprovida de supérfluos” sejam em relação a produtos, tempo e recursos utilizados (WOMACK; JONES; ROOS, 2004). Este princípio lista sete tipos de problemas:

- Super-produção
- Tempo de espera
- Transporte
- Excesso de Processamento
- Inventário
- Movimento
- Defeitos

Essa classificação é freqüentemente utilizada nas justificativas das propostas apresentadas para melhoria do processo. Abordaremos um pouco mais sobre este processo de melhorias no item 2.3 deste trabalho.

Uma importante característica do sistema lean é a valorização do trabalho humano, aproveitando a autonomia operacional dos funcionários responsáveis pelas atividades que efetivamente agregam valor ao produto (KUSIAK, 1986). Essa característica influencia diretamente a modelagem do sistema uma vez que podemos modelar o processo dos operadores ou o processamento das peças envolvidas e tratar os operadores como recursos flexíveis do sistema, conforme será mostrado adiante.

2.2 Modelagem de sistemas produtivos

Para o estudo e aplicação da modelagem de sistemas produtivos alguns conceitos são fundamentais. Dois principais conceitos são as definições de sistema e modelo. Sistema é definido como um grupo de objetos que estão agregados de acordo com uma relação de interdependência para atingir certos objetivos e modelo, em engenharia, pode ser definido como uma representação de um sistema com o intuito de estudá-lo (MIYAGI, 2007).

Ainda em Miyagi (2007) temos que para entender e analisar o sistema pode-se definir alguns termos:

- Entidade; é um objeto de interesse em um sistema.
- Atributo; é uma propriedade da entidade.
- Atividade; representa uma ação que ocorre dentro do sistema.
- Evento; é uma ocorrência que altera o estado do sistema (o evento pode ser entendido como uma atividade primitiva e instantânea que não admite decomposição).
- Estado; descreve uma situação do sistema e é identificado pelos valores das suas variáveis num determinado instante.

Um modelo é gerado a partir de um sistema analisando um conjunto de variáveis de entrada e saída do sistema que dependem do tempo. Desta forma, o modelo apresenta uma representação simplificada do comportamento do sistema destacando os objetos e as variáveis que se deseja analisar.

2.2.1 Redes de Petri

No item 2.1.1 classificamos nosso objeto de estudo como um Sistema a Eventos Discretos e, para uma análise adequada, devemos utilizar linguagens e ferramentas de modelagem específicas para o seu tratamento. Dentre as linguagens existentes

utilizaremos as Redes de Petri, pois entre diversas vantagens encontramos a facilidade de interpretação do sistema modelado (MIYAGI, 2007).

Um conceito primordial das Redes de Petri é a definição dos componentes ativos e passivos. Podemos entender os componentes passivos como aqueles capazes de armazenar itens, torná-los visíveis ou ambos. Podem assumir diferentes estados e são denominados distribuidores. Os componentes ativos são aqueles capazes de produzir, transportar ou alterar itens e são denominados atividades. Graficamente os distribuidores são representados por círculos e as atividades por retângulos (MIYAGI, 2007). Podemos definir também o componente ativo como transição, tendo uma barra como representação gráfica e o componente passivo como lugar representado ainda por um círculo (MACIEL; LINS; CUNHA, 1996). Relacionando esses dois componentes temos os arcos orientados. Os arcos orientados não representam componentes do sistema, eles definem os relacionamentos abstratos existentes entre os lugares e as transições (MIYAGI, 2007). As representações gráficas das Redes de Petri utilizando ferramentas computacionais são apresentadas nos próximos itens.

2.2.2 Redes Elementares

Redes Elementares, conhecidas também na literatura como Redes Clássicas ou Redes Condição-Evento (BRAUER; REISIG; ROZENBERG, 1987; REISIG; ROZENBERG, 1998) constituem uma versão atual para a aplicação sintética das diversas vertentes que surgiram sobre as redes de Petri propostas em 1962.

Para a aplicação de redes condição-evento podemos definir as seguintes regras (MIYAGI, 2007):

Constituintes:

- Condições, representadas por círculos (○);
- Eventos, representados por retângulos (□);
- Arcos orientados de condições a eventos ((○ → □));
- Arcos orientados de eventos a condições (□ → ○);
- Marcas em algumas condições (◎) indicam o case inicial.

Dados os componentes temos:

- Uma condição b é uma pré-condição do evento e se existe um arco $b \rightarrow e$;
- Uma condição b é uma pós-condição do evento e se existe um arco $e \rightarrow b$;
- Em qualquer situação dada, as condições são satisfeitas ou não-satisfeitas;
- Toda condição satisfeita é indicada por uma marca;
- Um case consiste de condições satisfeitas em uma dada situação.

Para a funcionalidade do sistema temos:

- Um evento de uma rede condição-evento pode ocorrer (em um dado case) se todas as suas pré-condições estiverem satisfeitas e se todas as suas pós-condições estiverem não-satisfeitas. Tais eventos são chamados de ativados.
- Se um evento está ativado e ele ocorre, as suas pré-condições deixam de ficar satisfeitas e as suas pós-condições são satisfeitas.

Uma característica das redes condição-evento que terá fundamental importância neste estudo é o comportamento não-determinístico no caso de um conflito. Temos que dois eventos de uma rede condição-evento estão em conflito entre si se ambos estão ativados e a ocorrência de um resulta na desativação do outro (MIYAGI, 2007).

Para o nosso estudo podemos ter como exemplo um operador com duas operações de solda para realizar, sendo as duas habilitadas para execução. Como as duas podem ser executadas e o operador não pode executar as duas simultaneamente não há definição de qual será realizada antes, a seqüência não é definida, por isso o comportamento é não-determinístico.

2.2.3 PFS (Production Flow System)

Para sistematizar e facilitar a modelagem por redes pode-se utilizar a técnica PFS que trata o sistema de forma hierárquica ao invés de desenvolver em um único

passo o modelo do sistema. A flexibilidade de representação, baseada principalmente nas inscrições em linguagem natural nos elementos, permite que se identifiquem algumas atividades que podem incluir vários outros eventos e estados organizados hierarquicamente e, assim, podemos tratar essas atividades como macro-eventos (MIYAGI, 2007). Os elementos estruturais do PFS são:

- Elementos de atividade ou atividades (ativos)
- Elementos de distribuição ou distribuidores (passivos)
- Arcos orientados de conexão (relações)

Os conceitos destes elementos já foram apresentados no item 2.2.1.

As regras para representação gráfica do PFS são:

- Distribuidores são representados por círculos O;
- Atividades são representadas por um bloco delimitado por dois colchetes [];
- Arcos orientados dos distribuidores às atividades O → [] ;
- Arcos orientados das atividades aos distribuidores [] → O;
- Inscrições em linguagem natural ou formal nos distribuidores, atividades e arcos.

Devemos atentar que o PFS não possui marcações ou quaisquer representações que representem o comportamento dinâmico do sistema que está sendo modelo. O objetivo deste modelo é representar a lógica de seqüenciamento para execução das atividades de um processo produtivo.

2.2.4 MFG (Mark Flow Graph)

O PFS descreve o sistema através de suas atividades. A partir do momento em que detalhamos as atividades até o seu nível primitivo em que não há mais refinamento, o emprego do PFS não é mais adequado e se faz necessário a utilização de outra

técnica para representar o comportamento dinâmico e a transição de estados que ocorre durante a execução dos processos.

O MFG, que será utilizado neste nível de detalhamento, possui em seus elementos estruturais:

- Box: indica uma condição e é representado por um bloco quadrado ;
- Transição: indica um evento e é representado por uma barra vertical ;
- Arco orientado: conecta boxes e transições indicando a relação entre uma condição e os pré e pós-eventos que o definem e é representado por uma seta ;
- Marca: indica a manutenção de uma condição e é representada por um ponto negro  no interior do Box correspondente a esta condição ;
- Porta: indica habilita ou inibe a ocorrência dos eventos correspondentes às transições e é representada por círculos nas extremidades dos arcos conectada à transição  (porta inibidora)  (porta habilitadora).
- Elemento externo: entrada ou saída de sinal do sistema para dispositivos externos dos grafos.

Para a construção de grafos MFG observa-se que:

- Os boxes e transições são necessariamente conectados de forma intercalada através dos arcos orientados.
- Não existe limite para o número de arcos que entram ou saem dos boxes e das transições. Porém, em um par transição-box pode existir no máximo apenas 1 arco entre estes elementos.

Como pudemos observar em seus elementos estruturais, ao contrário do PFS, o MFG possui marcações e, portanto, representações dinâmicas.

O estado de um sistema pode ser representado pelo arranjo das marcas no grafo, um arranjo de marcas define uma marcação e o estado global do sistema que está sendo modelado. O comportamento dinâmico do sistema é representado pela alteração dos estados causada pela ocorrência de eventos. Para representarmos

este comportamento é necessária que a transição esteja habilitada e seja disparável conforme definido a seguir:

Para que a transição esteja habilitada devemos ter:

- Nenhum Box de saída com marcas,
- Todos os Boxes de entrada com marcas,
- Nenhum arco habilitador no estado de desabilitação,
- Nenhum arco inibidor no estado de inibição.

Para que a transição seja considerada disparável ela deve estar habilitada e não possui:

- Nenhuma porta habilitadora externa no estado de desabilitação e
- Nenhuma porta inibidora externa no estado de inibição.

2.2.5 Ambiente Computacional baseado em Rede de Petri

Entre os softwares disponíveis para o desenvolvimento do modelo do sistema estudado, foi escolhido o simulador HPsim pela sua imediata representação da rede de Petri através de uma interface intuitiva de fácil utilização. Além disso, este software permite acompanhar a evolução do estado de uma rede de uma forma gráfica, o que nos ajuda no desenvolvimento do modelo e na detecção de erros na modelagem. Por fim o HPsim ainda proporciona a gravação dos dados de simulação podendo ser utilizados para tratamento em outros softwares como o Microsoft Excel - vantagem importante para análise de novas propostas de processo.

2.3 A técnica Kaizen

A técnica Kaizen fundamenta-se na melhoria contínua do processo. Em Imai (1992) temos o Kaizen apresentado como contínuo melhoramento envolvendo todos, ou

seja, liderança e chão-de-fábrica. Para Brunet e New (2003), Kaizen é uma atividade contínua e gradual, fora do contrato explícito do participante, para identificar e conquistar resultados que o empregado acredita que contribui para os objetivos da organização, excluindo a formulação da estratégia e o projeto dos sistemas de produção. Ainda em Brunet e New (2003), temos listadas e definidas três atividades fundamentais pertinentes ao Kaizen:

- i. ZD – ações baseadas no conceito “defeito zero” na empresa, nas quais os empregados de forma espontânea e autônoma melhoram o processo.
- ii. Sugestões – operações do sistema de sugestões. Esta atividade requer um alto grau de organização para avaliação e implementação das sugestões que surgem por análise diária dos empregados.
- iii. SGA (Small Group Activity) – atividades de pequenos grupos que formam o núcleo de todas as atividades Kaizen.

A necessidade da participação de todos da empresa na execução da técnica Kaizen é reforçada e descrita em Imai (1992) na Tabela 2.

Como existe a participação de todos no processo de Kaizen, uma integração dos diferentes níveis hierárquicos se demonstra interessante para a rapidez e eficácia da implementação das melhorias necessárias. Neste contexto, o modelo e a metodologia desenvolvidos neste trabalho contribuem para o sucesso harmonioso desta integração, através de análises e validações em diferentes níveis de abstração.

Por sua vez, as sugestões podem ser modeladas formalmente para que se proceda a uma análise sistemática das mesmas otimizando os resultados de melhoria contínua propostos pela técnica Kaizen.

2.3.1 Ciclo PDCA

A técnica Kaizen faz parte dos conceitos aplicados no ciclo PDCA na etapa de execução, onde eventualmente determinam-se novos planos de ação, de forma a melhorar a qualidade, eficiência e eficácia, aprimorando a execução e corrigindo

eventuais falhas (ORIBE, 2009). Além da busca por melhorias contínuas, temos também no ciclo a aplicação de planejamento, análise e estudo das atividades realizadas em um processo.

Tabela 2 - Atribuições de Kaizen em diferentes níveis hierárquicos

Alta Gerência	Média Gerência	Supervisores	Operários
Estar determinada a introduzir o Kaizen como estratégia da Corporação	Distribuir e implantar as metas do Kaizen orientadas pela Alta Gerência. Através de desdobramento do plano de ação e de administração multifuncional	Usar o Kaizen nas tarefas funcionais	Participar do Kaizen através do sistema de sugestões e das atividades em pequenos grupos
Oferecer apoio e direção para o Kaizen pela distribuição de recursos	Usar o Kaizen nas capacidades funcionais	Formular planos para o Kaizen e oferecer orientação aos Operários	Praticar a disciplina na área de trabalho
Estabelecer o plano de ação Kaizen e as metas multifuncionais	Estabelecer, manter e melhorar os padrões	Melhorar a comunicação com os operários e manter o moral elevado	Envolver-se no contínuo desenvolvimento próprio para tornar-se melhor solucionador de problemas
Realizar as metas do Kaizen e as metas multifuncionais	Conscientizar os empregados sobre o Kaizen através de programas intensivos de treinamento	Apoiar as atividades em pequenos grupos e sistema de sugestões individuais	Ressaltar a habilidade e a experiência no desempenho do serviço, aprendendo várias funções
Criar sistemas, procedimentos e estruturas úteis para o Kaizen	Ajudar os empregados a desenvolverem habilidades e ferramentas para a solução de problemas	Introduzir a disciplina na área de trabalho e oferecer sugestões de Kaizen	

O ciclo PDCA, idealizado por Walter A. Shewhart e efetivamente aplicado por William Edward Deming, é um método focado na busca por melhorias em processos através de quatro etapas que contemplam sua sigla: Planejar (Plan), Executar (Do), Verificar (Check) e Agir (Act).

A etapa de planejamento consiste em estabelecer metas ou identificar problemas, analisar o sistema e o processo e, baseado nesse estudo, elaborar um plano de ação. Na verificação, os resultados são comparados com o planejado: neste momento é identificado se há a necessidade de um novo plano de ação, e, dependendo do resultado da fase de avaliação, elabora-se ou não um novo plano de ação, de acordo com a necessidade.

A modelagem discreta de sistemas pode contribuir significadamente para a aplicação do ciclo PDCA em sistemas produtivos. Sua aplicação permite um planejamento mais detalhado do processo e a análise pode ser realizada previamente através da simulação, tornando-se possível a identificação de problemas sem a necessidade da execução em chão de fábrica. Este estudo também otimiza a etapa de verificação, tornando mais coesa a verificação dos resultados.

O ciclo PDCA utiliza preferencialmente dados estatísticos em sua etapa de avaliação. Estes mesmos dados devem se relacionar diretamente com os dados utilizados nas simulações e, portanto, são integrantes fundamentais na modelagem do sistema, podendo ser identificados, por exemplo, como entidades ou atributos. A partir do modelo do sistema, pode-se, de forma mais eficiente, comparar os resultados e identificar as causas dos possíveis problemas e discrepâncias encontradas.

3 PROPOSTAS DE MÉTODOS DE INTERAÇÃO COM O KAIZEN

Foram desenvolvidos três modelos em um processo iterativo analisando e identificando suas qualidades e pontos de melhoria focando e documentando o desenvolvimento da metodologia de modelagem para este processo que tem entre suas características mais presentes, a forte presença de operação humana interagindo com os processos automatizados da linha de produção. E por tal característica, vamos considerar como exemplo uma célula produtiva complexa, envolvendo operação humana.

A manufatura de um veículo se divide basicamente em quatro grandes partes:

- Estamperia - Onde as peças metálicas são conformadas na grande maioria por prensas hidráulicas;
- Funilaria - Parte de funilaria, onde as peças metálicas são soldadas;
- Pintura - Onde ocorre a pintura do conjunto de peças metálicas formado ao final da parte de funilaria e;
- Montagem Final - Onde ocorre a montagem final dos componentes do veículo como motor, peças plásticas e detalhes internos entre outros.

Analizando as quatro partes do processo, percebemos uma complexidade de operação humana e freqüentes mudanças no processo para melhorias contínuas na parte de funilaria. Vamos utilizar, portanto, uma célula produtiva da parte de funilaria de montagem do compartimento do motor de um veículo na análise das iterações até a definição da metodologia adequada para os modelos. A Figura 2 ilustra nosso exemplo:

A montagem do conjunto é dada pelo posicionamento de peças oriundas da parte de funilaria em um dispositivo fixo que permite a soldagem das peças. O transporte das peças pode ser manual, por talha mecânica, por talha elétrica ou por transporte automático dependendo das dimensões da peça. O processo de soldagem, quando manual, é realizado utilizando máquinas de solda manuais, que, por razões de processo, não são compartilhadas entre os operadores humanos, evitando assim travamento do sistema por conflito.

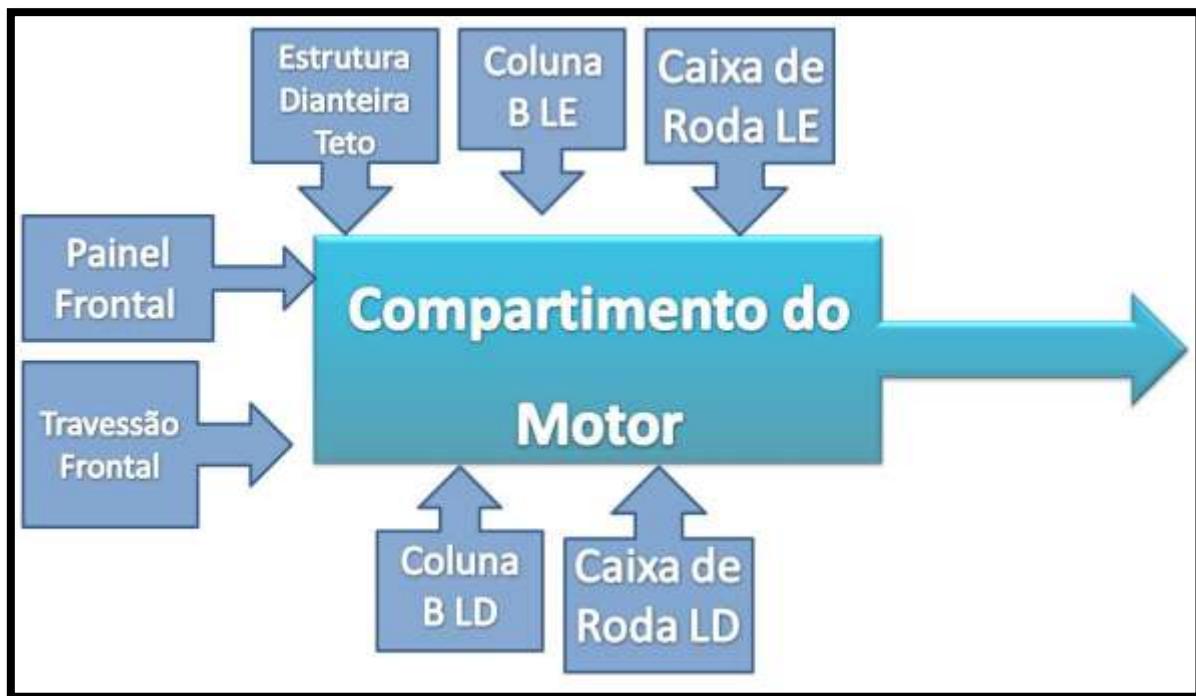


Figura 2 - Exemplo de uma célula produtiva de compartimento do motor

Nesta célula, vamos considerar:

- quatro operadores;
- entrada de sete peças;
- estrutura dianteira do teto;
- travessão frontal;
- painel frontal;
- coluna B;
- caixa de roda (sendo as duas últimas adicionadas em duas unidades por ciclo, uma para o lado esquerdo do produto e outra para o lado direito);
- oito processos de solda e dois de aplicação de cola.

O transporte das peças maiores (travessão frontal, painel frontal e o produto final) é realizado por meio de talhas elétricas.

3.1 Método 1 – Realidade atual

O primeiro método reflete a atualidade atual. O seu desenvolvimento deu-se como forma de representar o pensamento real que é dado no projeto de linhas de montagem.

O modelo da Figura 3 é uma representação em Rede de Petri da atual metodologia aplicada, podemos perceber um foco nas atividades a serem desenvolvidas pelo operador. O modelo demonstra-se rígido e sem a flexibilidade real do processo. Nota-se a necessidade de quebrar este paradigma desenvolvendo um modelo focado no processamento das peças. Antes deste novo modelo, vamos analisar o diagrama PFS deste método na Figura 4.

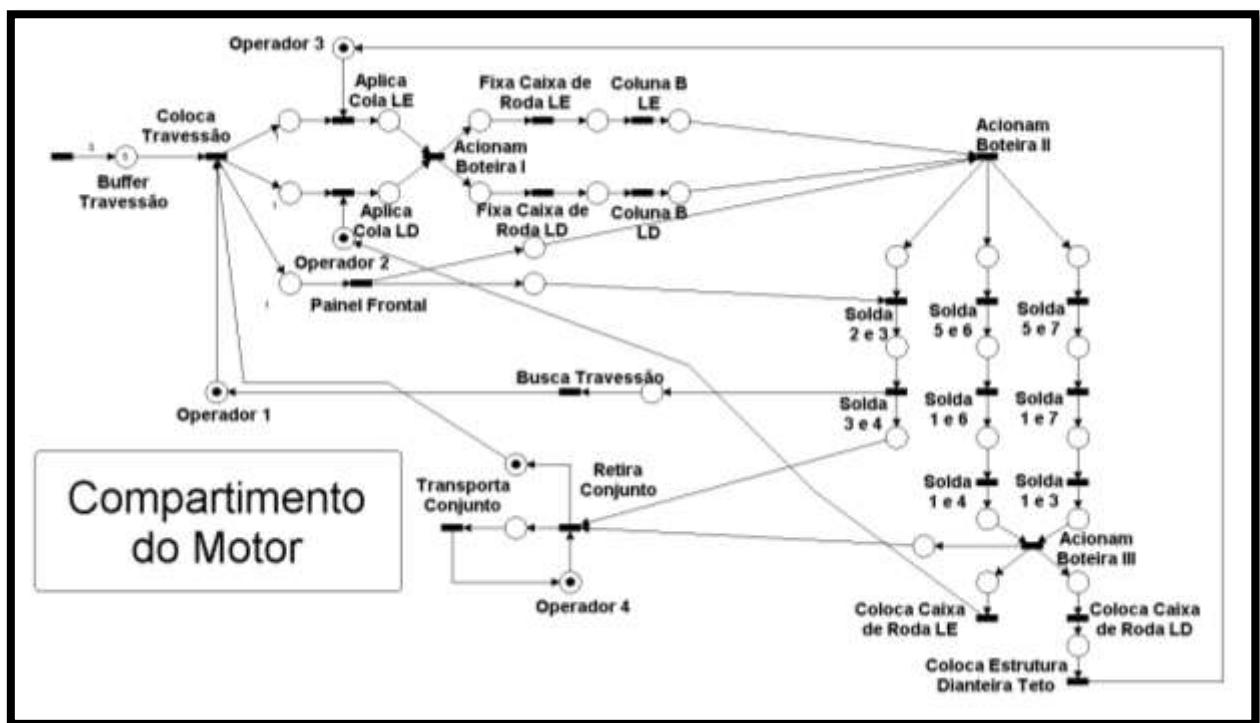


Figura 3 - Método 1 - Realidade atual

Nesta primeira versão, procurou-se modelar a realidade atual que descreve o processo de manufatura. O diagrama PFS reforça a análise de que o processo está rígido e não estruturado, dificultando análises e obtenção de resultados. Logo, vemos que a entidade modelada não correspondeu às peças e as correspondentes atividades para a fabricação do produto final, mas sim o fluxo de atividades do operador. Esta identificação foi simples a partir do momento em que adotamos o formalismo dos modelos PFS e seus elementos em que, necessariamente, uma

atividade representa um processo de transformação do item que está sendo fabricado. É necessário, portanto, quebrar o paradigma de modelagem, modelando o processo em si e a autonomia dos operadores, desta forma, será possível analisar alternativas de melhorias.

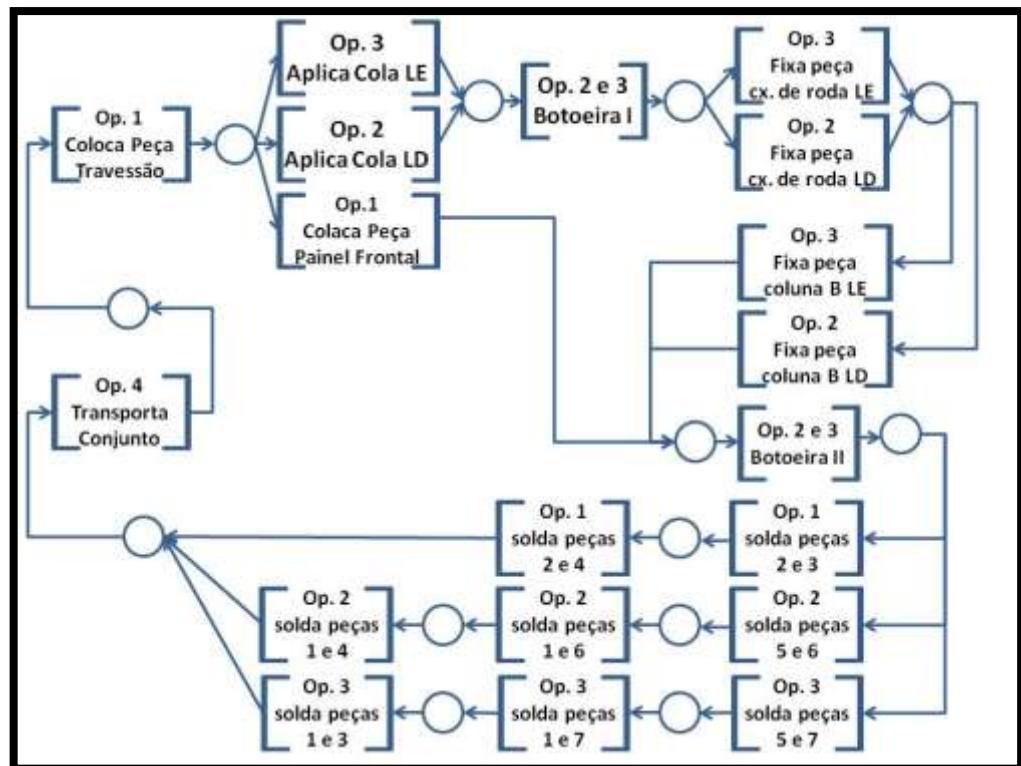


Figura 4 - PFS do primeiro método: foco no operador

Em um processo onde se aplica Kaizen, a geração desta primeira versão de modelo é fundamental para conscientização da equipe a respeito da lógica que estava sendo adotada para o projeto do controle da produção.

3.2 Método 2 – Quebra de paradigma

No Método 2 vamos forçar a modelagem com foco no processamento das peças, caracterizando o operador como um recurso do sistema. Utilizando as definições do item 2.2 deste trabalho, podemos entender melhor as diferenças dessas duas abordagens: na primeira abordagem a entidade do modelo é o operador e na

segunda a entidade do modelo são as peças que, no final do processo, compõe o produto final. Desta forma, o operador passa a ser abordado como um recurso do sistema, sendo possível modelar sua flexibilidade e autonomia na definição da rota de produção.

A Figura 5 apresenta o modelo em Rede de Petri para o Método 2. Temos a representação do sistema em Rede de Petri com o foco no processo, isto é, temos agora como entidades do sistema as peças envolvidas e o produto final e temos também os operadores como recursos que são alocados para cada atividade ou evento do processo. A disponibilidade do operador torna-se assim uma pré-condição para um determinado evento. Neste novo modelo, a seqüência das operações não é previamente atribuída (comportamento não-determinístico): temos o processamento de cada elemento do produto final modelado com sendo um subsistema, que aloca o operador como sendo um recurso do sistema completo. O processamento de cada elemento possui suas condições, ou seja, para serem executados dependem que certos eventos ocorram. Por exemplo, para que uma peça seja posicionada no dispositivo é necessário que o produto final do ciclo anterior já tenha sido retirado do dispositivo, assim como para que uma peça seja soldada, é necessária que ela já tenha sido posicionada e devidamente fixada. Com isso podemos perceber a presença de arcos inibidores, diferentemente da modelagem anterior.

Na Figura 6 apresentamos uma ampliação do grafo destacando a execução de uma atividade para análise do método empregado.

Como pré-condição deste processo pode-se notar que para posicionar uma peça é necessário que tenha sido encerrado o ciclo anterior, assim como para se retirar uma peça é necessário que não exista uma peça recém posicionada.

Estas pré-condições fazem com que o operador não repita as mesmas operações repetidas vezes por ciclo, sem, necessariamente, definir uma seqüência de operação. Como recursos alocados percebemos o Operador 1 (para retirar e posicionar a peça), o Operador 2 (para aplicação de cola no lado direito) e o Operador 3 (para aplicação no lado esquerdo), lembrando que a disponibilidade do operador é uma pré-condição. Como produto final desta atividade tem-se a peça Travessão posicionada e com aplicação de cola o que habilita (pós-condição) o processo da peça Painel Frontal e do Posicionamento automático.

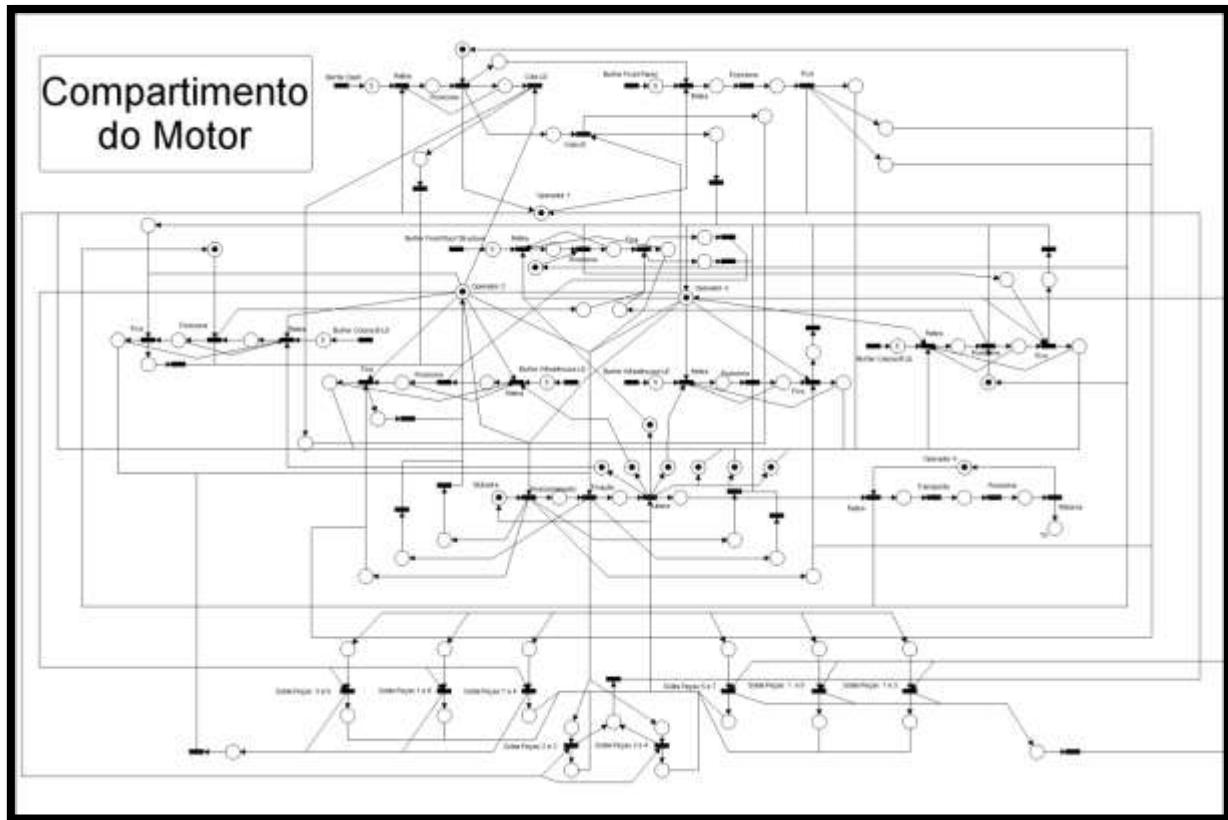


Figura 5 - Método 2: Quebra do paradigma. Foco no Processo

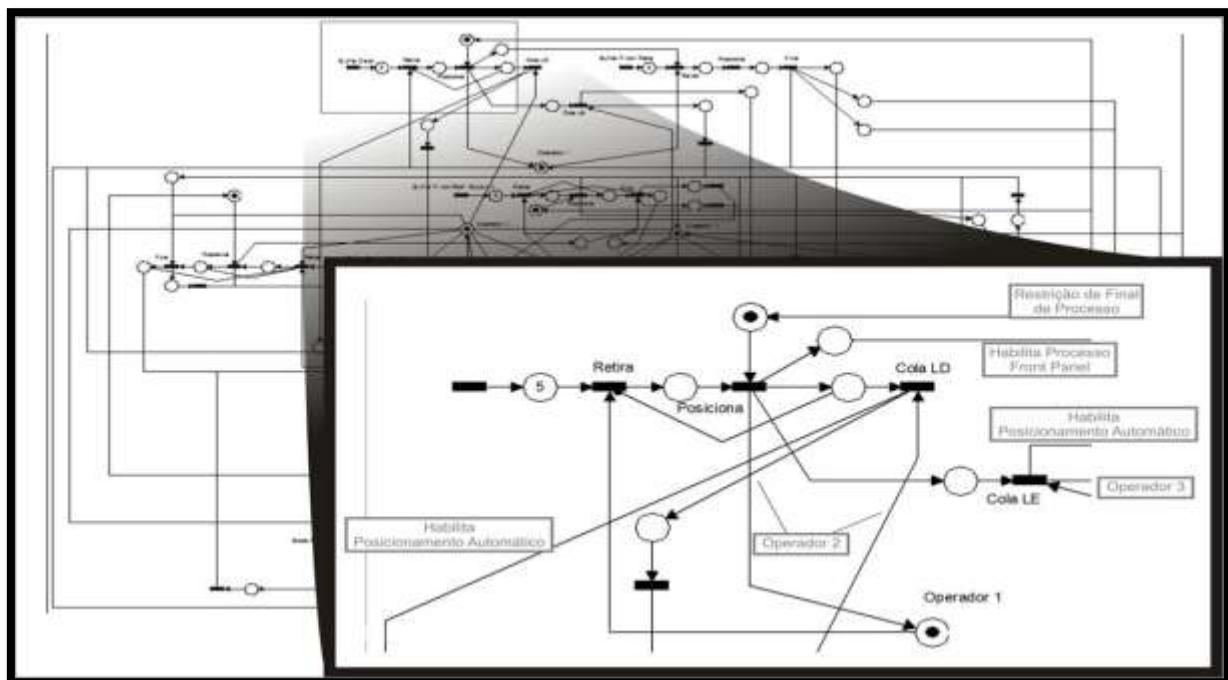


Figura 6 - Detalhamento do Segundo Método

É notável que o grafo do sistema modelado com foco no processo possui uma maior complexidade, a facilidade de interpretação do modelo que é uma das vantagens da Rede de Petri (MIYAGI, 2007) fica assim prejudicada. Demonstra-se desta forma a necessidade da aplicação de uma metodologia para a geração dos modelos.

Neste modelo o operador é alocado com um recurso do sistema, porém o sistema ainda não representa a flexibilidade real do operador. Em seguida analisamos o diagrama PFS deste método (Figura 7).

Pode-se notar a preocupação em evidenciar o operador como recurso do sistema, porém, temos dificuldades para interpretação dos fluxos de atividades que ocorrem no modelo. Por exemplo, não conseguimos visualizar o começo ou o fim do processo e desta forma temos dificuldade para propor diferentes estratégias de controle e também de documentação para futura interpretação. Além disso, não temos ainda todas as restrições implementadas no modelo. Neste momento, podemos perceber que uma das grandes dificuldades enfrentadas é modelar o processo original sem as restrições fictícias impostas pelo projeto da empresa. Isto é, devemos eliminar as restrições que não fazem parte do processo original de fabricação do veículo.

3.3 Método 3 – Eliminação das restrições fictícias

Como tentativa de melhorar os resultados obtidos nos dois modelos desenvolvidos inicialmente, devemos empregar uma metodologia de modelagem desenvolvendo sucessivos grafos em PFS e MFG, de forma sistemática, agregando o conceito de refinamento sucessivo e estruturação de modelos. Desta forma poderemos representar os diversos níveis de controle do sistema.

Começamos representando no nível 1, as quatro grandes partes do processo de manufatura de um veículo automotivo, conforme indicado no início deste capítulo (Figura 8).

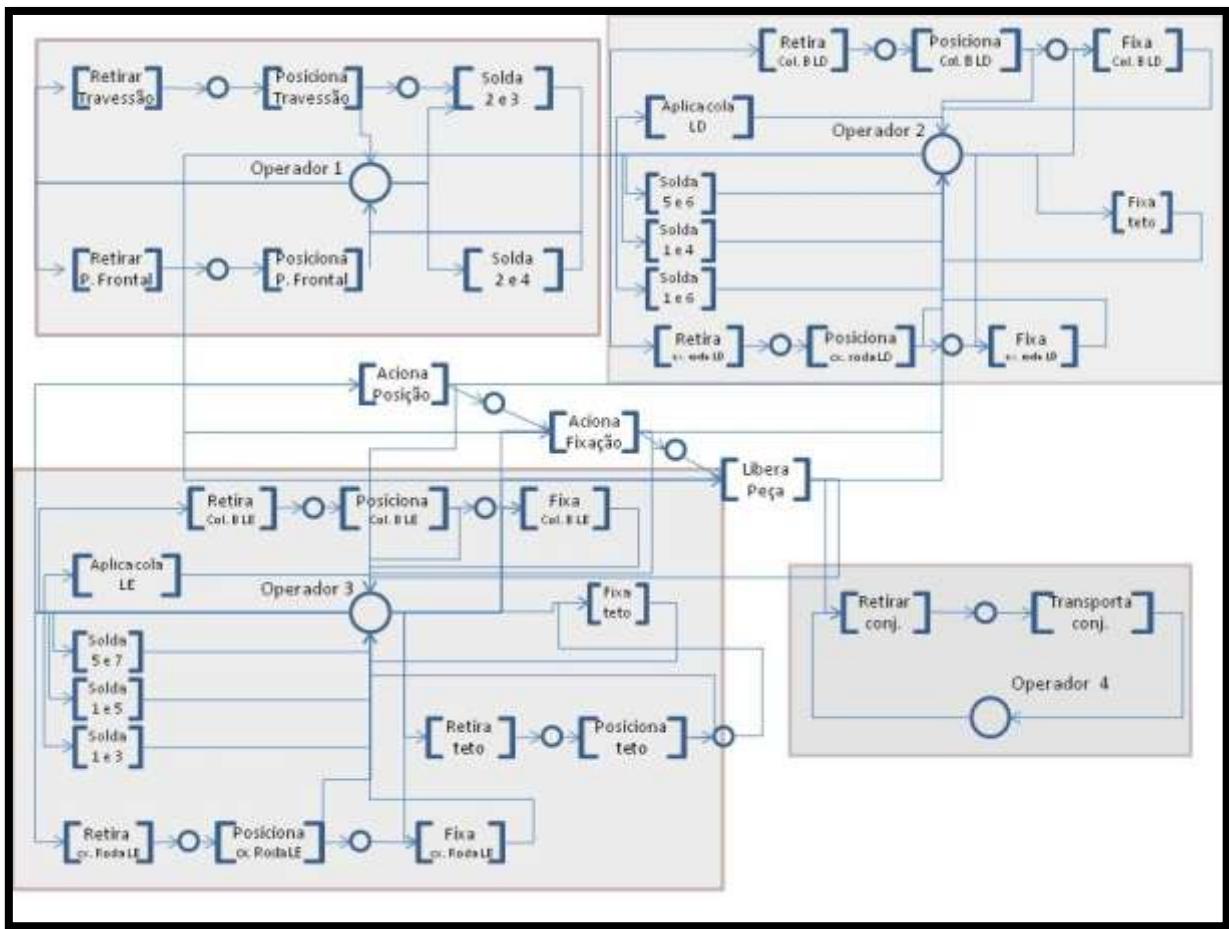


Figura 7 - PFS do segundo método: quebra do paradigma

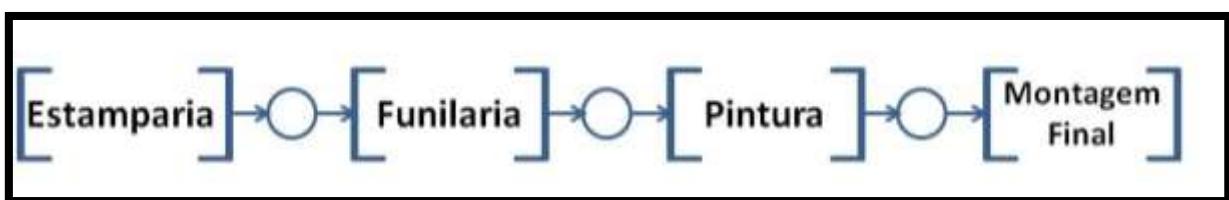


Figura 8 - PFS Nível 1 – Exemplo

Vamos, portanto, como exemplo, analisar a atividade *Funilaria*. Podemos dividi-la em duas partes: a primeira que forma a estruturação da carroceria sem os fechamentos (portas, tampa do porta mala e tampa do motor), sendo eles os responsáveis pela segunda parte.

Em nosso estudo, vamos analisar a parte que forma a carroceria sem os fechamentos (Figura 9).

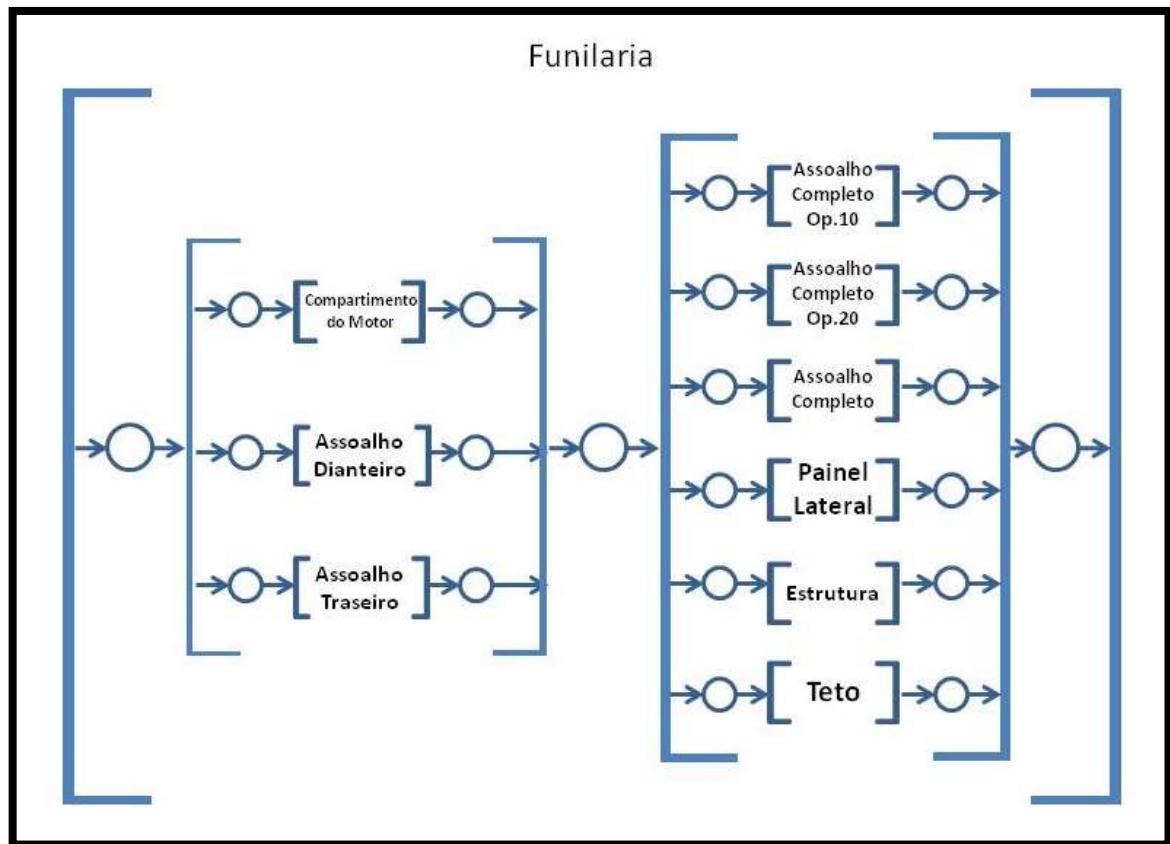


Figura 9 - PFS Nível 2 – Exemplo

Na Figura 9 temos o detalhamento do processo de funilaria dividido em células produtivas que possuem como produto, subconjuntos que vão compor a funilaria do veículo. O fluxo de atividades é bem representado neste PFS. No próximo passo detalhamos a célula produtiva analisada como exemplo, o *Compartimento do Motor* (Figura 10).

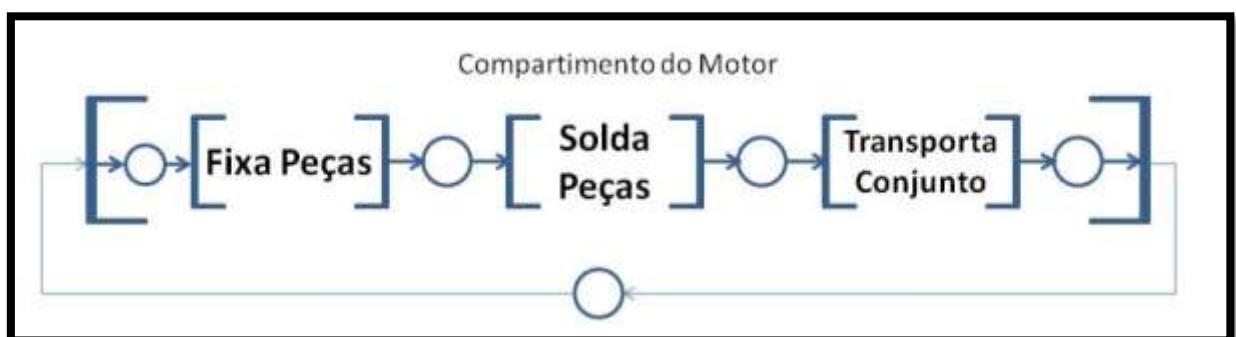


Figura 10 - PFS Nível 3 – Exemplo

Esta é uma parte fundamental da metodologia do processo de modelagem, onde estabelecemos as principais atividades (ou funcionalidades) da parte de funilaria que definem o processo. A principal atividade é a soldagem de peças que, por sua vez, é naturalmente precedida de atividades de transporte, posicionamento e fixação de peças. Desta forma, conseguimos identificar o processo original de manufatura do veículo. Devido à quantidade de peças desta célula, ainda é possível detalharmos a atividade *Fixa Peças* em outro grafo PFS (Figura 11).

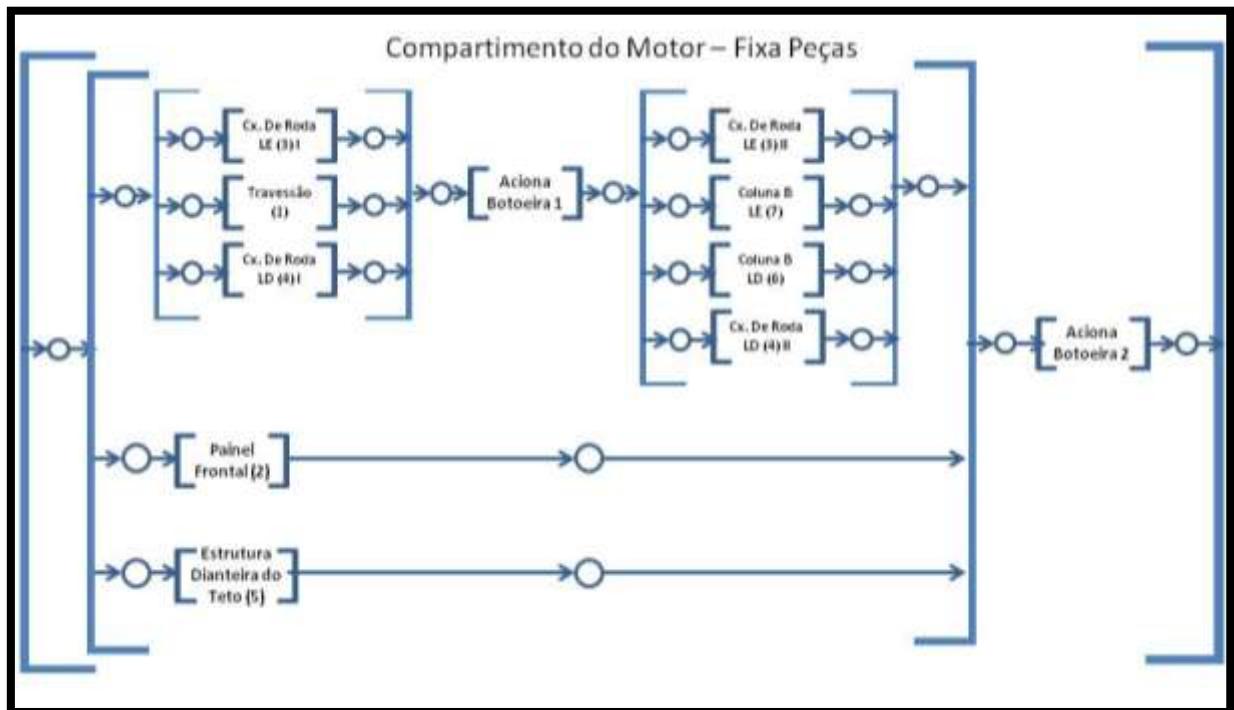


Figura 11 - PFS Nível 4 – Exemplo

Neste grafo definimos o processo real das peças. Nota-se que não houve a preocupação com a identificação do operador e sim com a identificação das principais atividades do sistema.

Até o momento, representamos as atividades desenvolvidas no processo, a partir do próximo nível, começamos a representar as operações realizadas dentro de cada atividade. Outra importante diferença no terceiro método é a utilização de grafos MFG utilizando oportunamente elementos da técnica PFS para representar níveis mais detalhados do processo.

A Figura 12 mostra o refinamento a nível operacional da atividade *Fixa Peças*.

Introduzimos assim o operador como recurso do sistema, alocado para a realização de determinadas operações dentro das atividades definidas no PFS.

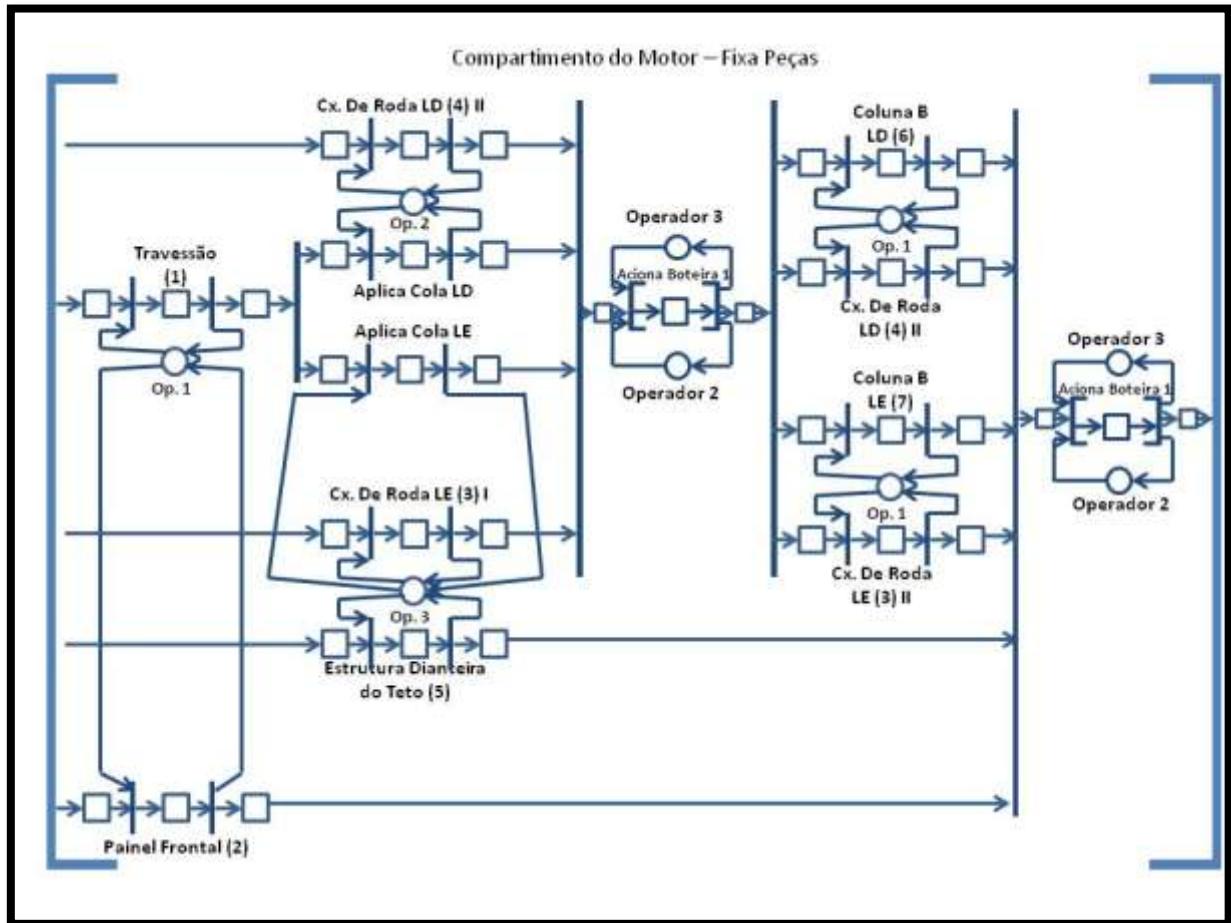


Figura 12 - MFG - Fixa Peças – Exemplo

É importante salientarmos que a restrição indicada na Figura 10 garante o ciclo do processo, isto é, a atividade *Fixa Peças* e, por consequência, suas operações só podem ser iniciadas após o término de todas as atividades previstas. A atividade *Solda Peças*, não teve um detalhamento em PFS, pois consiste basicamente de processos operacionais conforme mostrado no grafo MFG na Figura 13.

Após a aplicação do método de refinamento sucessivo e a consequente representação dos diferentes níveis de controle até o nível denominado operacional, a representação final em Rede de Petri é imediata (Figura 14).

Neste modelo conseguiu-se satisfatoriamente representar o processo real de manufatura do produto. Neste contexto, obtém-se um modelo que:

- É capaz de viabilizar análises qualitativas e quantitativas do sistema;

- Permite análise de propostas de diferentes fluxos de processo;
- Representa o operador como recurso do sistema e sua autonomia;
- Representa o processo real de manufatura (livre de restrições fictícias);
- Possui fácil interpretação do fluxo de atividades e;
- Está adequado para documentação e posterior interpretação do sistema.

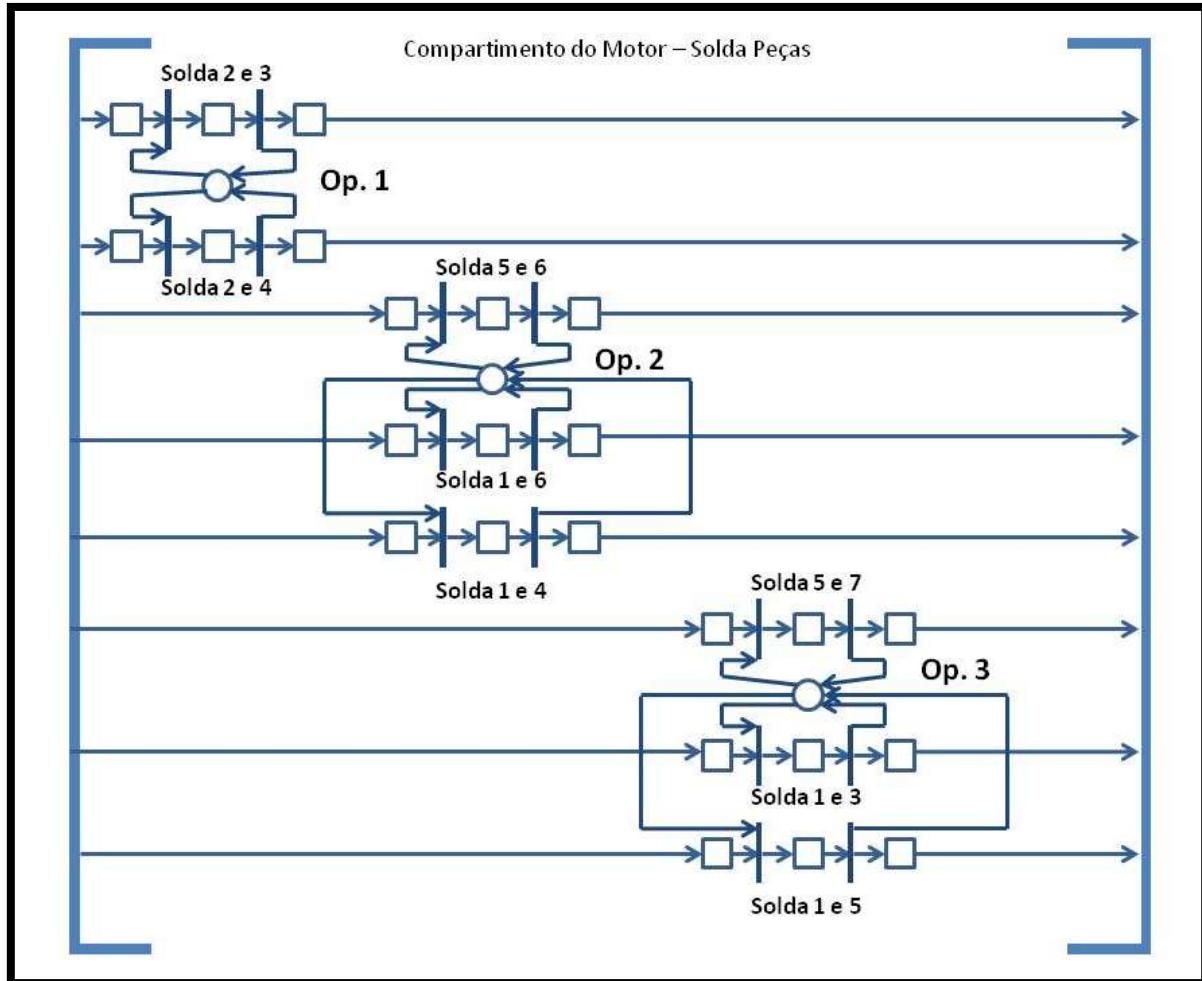


Figura 13 - MFG - Solda Peças – Exemplo

Desta forma, o modelo gerado a partir do terceiro método é a concepção que permite a integração dos conceitos de modelagem discreta com a técnica Kaizen aplicada em chão de fábrica. De acordo com as responsabilidades para aplicação do Kaizen descritas na Tabela 2, podemos notar que o modelo gerado pode ser aproveitado nos diferentes níveis de gerência para a integração com o chão-de-fábrica. Além disso, é possível utilizar recursos de simulação como suporte a tomada de decisões nas alterações estruturais do fluxo do processo, o que resultará em um

processo mais dinâmico de Kaizen, redução de gastos e maior eficiência na implementação de novos projetos.

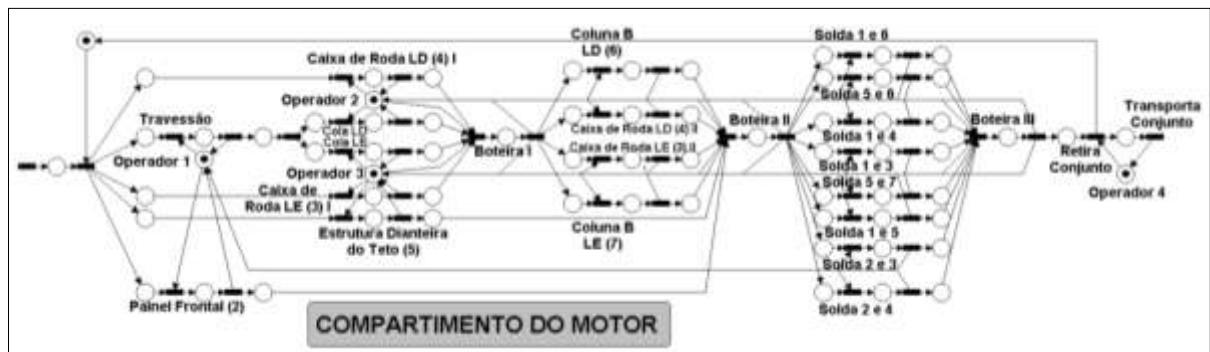


Figura 14 - Modelo Final em Rede de Petri do terceiro método - Exemplo

3.4 Procedimento para aplicação do método

Descrevemos neste item, os principais passos que constituem um procedimento para a aplicação do método desenvolvido. Este procedimento deve ser capaz de permitir a aplicação do método em qualquer parte do processo de manufatura de veículos automotivos. São eles:

1. Partição do Sistema Produtivo em Processos Individuais
2. Refinamento de cada Processo em Atividades (= Funcionalidade)
3. Refinamento de cada Atividade em um Conjunto de Operações
4. Representação dos Recursos Necessários para Cada Operação

Para a correta aplicação do método, é aconselhável a utilização dos grafos PFS para representação do processo por meio de atividades e dos grafos MFG para a representação dos níveis operacionais.

4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

4.1 Descrição

Apresentaremos neste capítulo um exemplo de aplicação do método desenvolvido. Como exemplo, vamos considerar a parte de funilaria que contém a célula produtiva denominada Compartimento do Motor que foi considerada para ilustrar o desenvolvimento do método no capítulo anterior. Na Figura 9, onde desenvolvemos o fluxo de atividades em um grafo PFS, foram apresentadas as demais células, sendo elas: Assoalho Dianteiro, Assoalho Traseiro, Assoalho Completo, Painéis Laterais, Estrutura e Teto. Com essas células, teremos como produto final a carroceria completa do veículo a ser montado sem os fechamentos (portas, tampa do porta-malas e tampa do motor). O fluxograma da Figura 15 mostra a organização destas células.

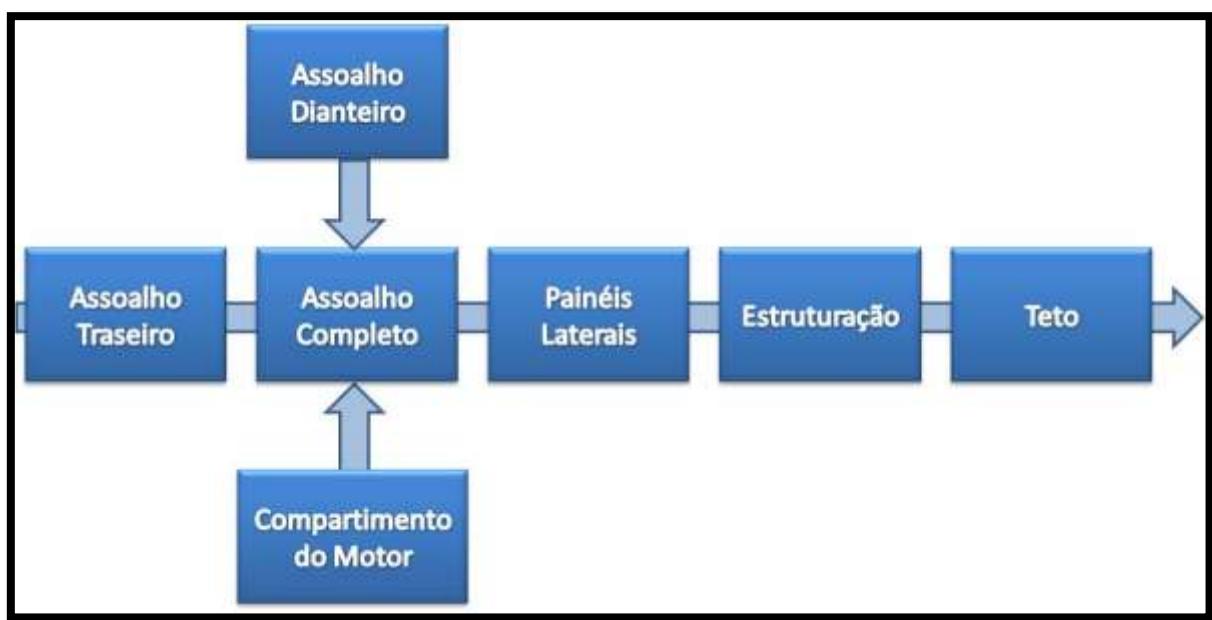


Figura 15 - Exemplo de Aplicação - Fluxograma das células produtivas

Vamos considerar neste exemplo que o subconjunto produzido nas células Assoalho Traseiro, Assoalho Dianteiro e Compartimento do Motor são transportados por talha elétrica com a operação de um agente humano. O sistema de transporte a partir da

célula Assoalho Completo até o final desta linha de montagem será denominado Transportador e interliga estas células, isto é, a operação de transporte será a esma. Este é um ponto importante para testarmos o método desenvolvido, isto porque este sistema de transporte automático exige que cada célula produtiva interligada por ele, só possa iniciar um novo ciclo após todas concluírem o ciclo anterior.

4.2 Composição

Descrevemos neste item a composição de nosso exemplo levando em consideração a quantidade de operadores, peças e operações em cada célula produtiva. A célula produtiva Compartimento do Motor já está descrita no capítulo anterior, descreveremos a seguir as demais células.

4.2.1 Assoalho Dianteiro

A célula do Assoalho Dianteiro pode ser separada em duas partes, denominadas Parte A e Parte B. Na Parte A, temos dois operadores e transporte manual das peças *Longarina Dianteira* (lado esquerdo e direito), *Travessa Dianteira*, *Travessa Traseira* e *Fechamento de Travessa* para o dispositivo de fixação, após cinco processos de soldagem temos transporte por talha para o dispositivo de fixação a direita que, com dois operadores, recebe a peça *Assoalho Dianteiro* também por talha elétrica e possui quatro processos de soldagem e dois processos de rebitagem mecânica. O produto final da célula é transportado por talha elétrica para um buffer (Figura 16).

4.2.2 Assoalho Traseiro

Na Figura 17 temos a célula de montagem do Assoalho Traseiro. Nesta célula, com dois operadores, entram manualmente as peças *Painel Traseiro* e *Caixa de Roda*, sendo esta última com duas unidades (lado esquerdo e lado direito). Temos também a entrada da peça *Assoalho Traseiro* por talha elétrica.

Após cinco processos de soldagem o produto final é transportado, por talha elétrica, para o dispositivo de fixação da primeira parte da célula *Assoalho Completo*.

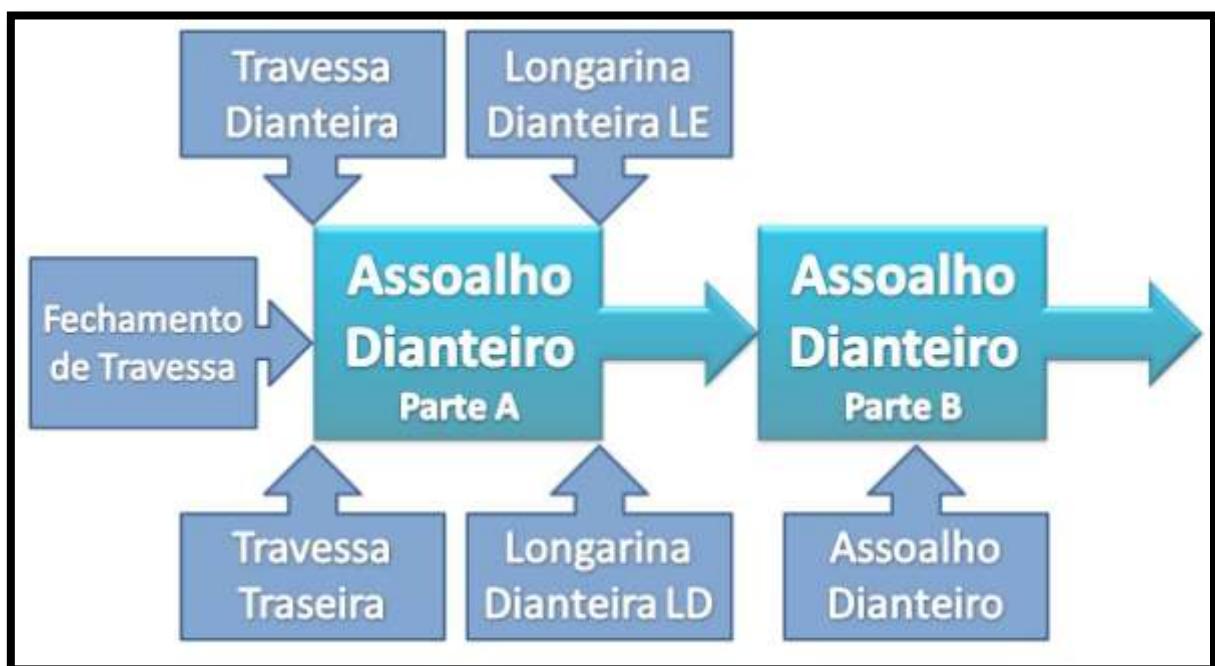


Figura 16 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Dianteiro

4.2.3 Assoalho Completo

Esta célula será dividida em seis partes, nomeadas com letras de A a F (Figura 18 e Figura 19). A Parte A desta célula recebe, além do Assoalho Traseiro, o produto final da célula Assoalho Dianteiro, possuindo um único operador. Esta é a primeira estação de trabalho cujo produto final é transportado pelo sistema de transporte automático que denominamos Transportador, introduzido no início deste capítulo.

Além do produto da Parte A, a Parte B recebe também o produto final da célula Compartimento do Motor, as peças Painel Lateral do Assoalho (lado esquerdo e

direito) e Reforço do Cinto (lado esquerdo e direito) e uma etiqueta de identificação. A Parte B possui oito processos de solda e dois operadores.

Nas partes C, D, E e F não há adição de peças ao produto, apenas processos de soldagem. Nas partes C, E e F temos soldagem manual com dois operadores cada. A Parte D consiste em uma célula automática de soldagem.

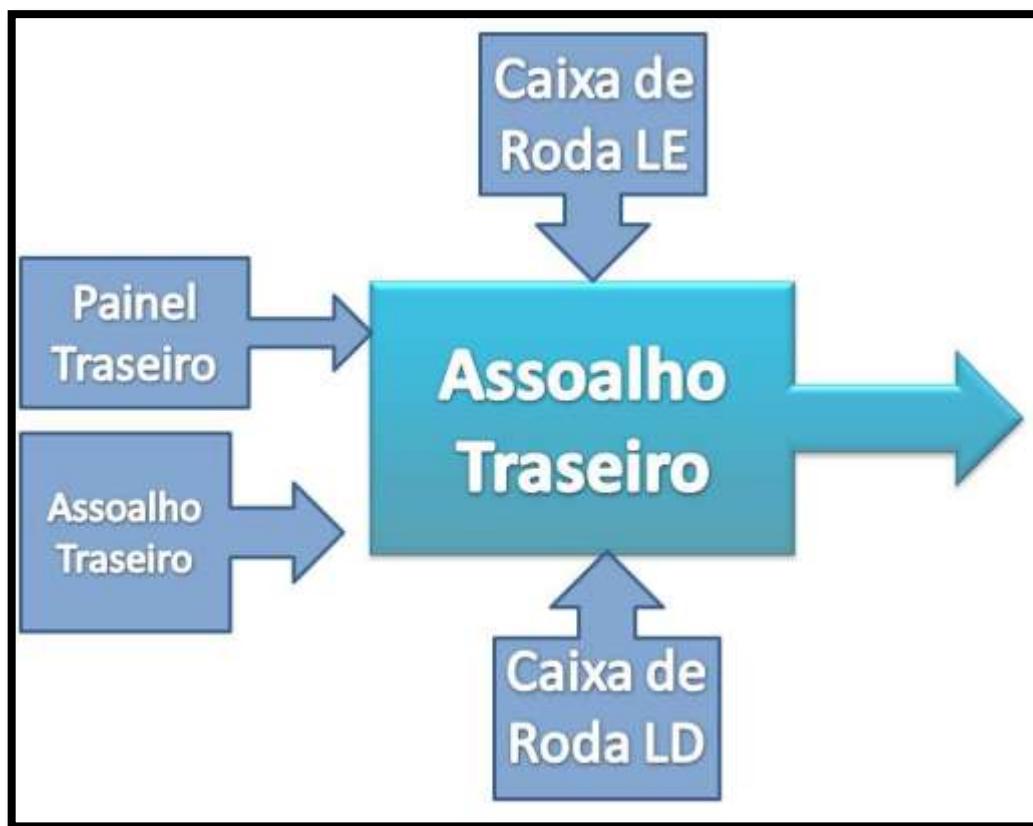


Figura 17 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Traseiro

4.2.4 Painéis Laterais

A célula de Painéis Laterais é dividida em duas partes, A e B (Figura 20). A parte A contém um único operador e consiste na aplicação de cola sobre a funilaria para o recebimento de novas peças na próxima parte. Na Parte B, com dois operadores, são adicionadas as duas laterais do veículo, transportadas através de talha elétrica além das peças Travessa do Teto, Suporte do Teto e Painel Divisor, transportadas manualmente, não há processo de soldagem nesta parte, apenas processo de

fixação manual. Após o processo de fixação o produto é transportado para uma célula automática de soldagem.

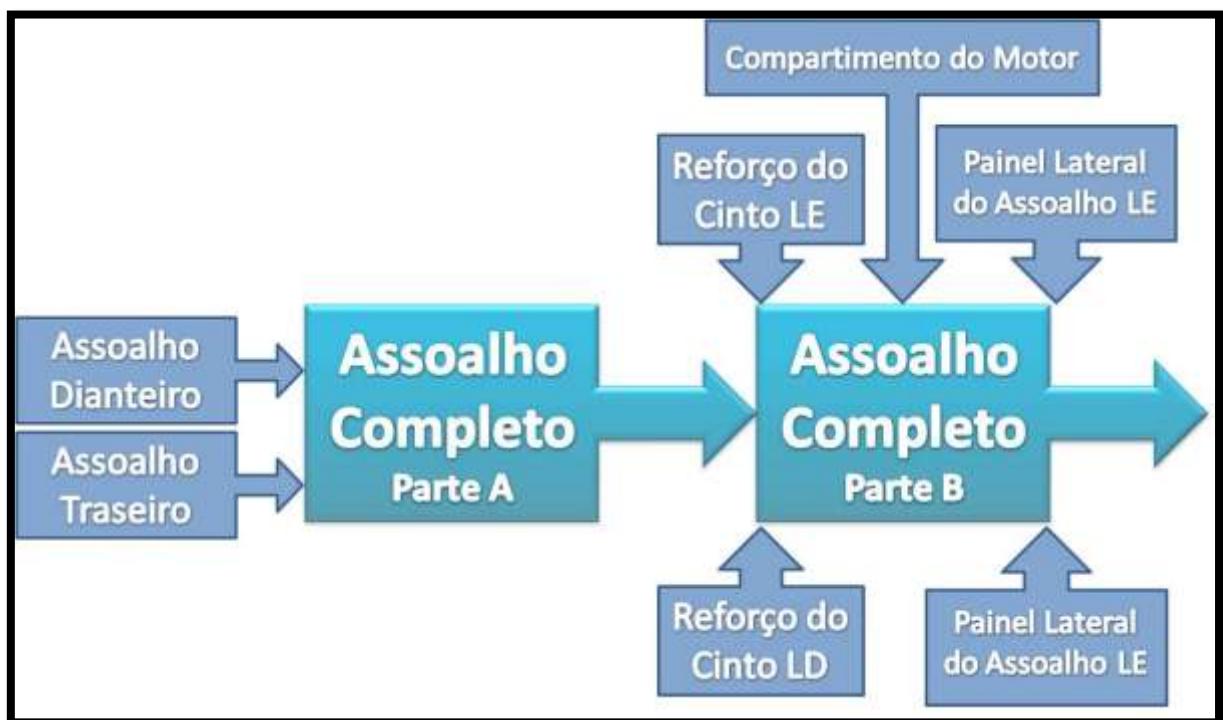


Figura 18 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo Partes A e B

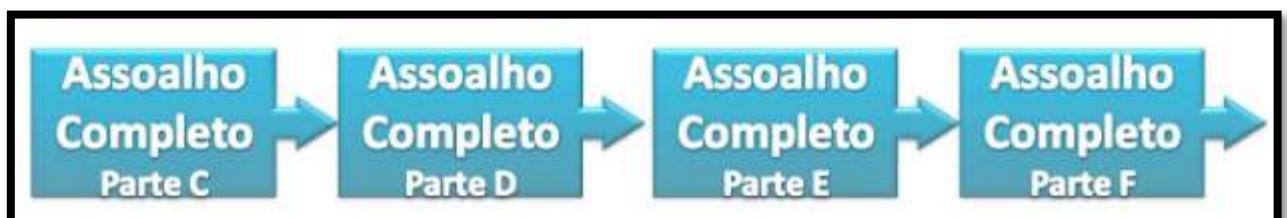


Figura 19 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo Partes C, D, E e F

4.2.5 Estruturação

A célula de estruturação consiste simplesmente de uma célula automática de soldagem, sem adição de peças e sem a presença de operadores humanos.

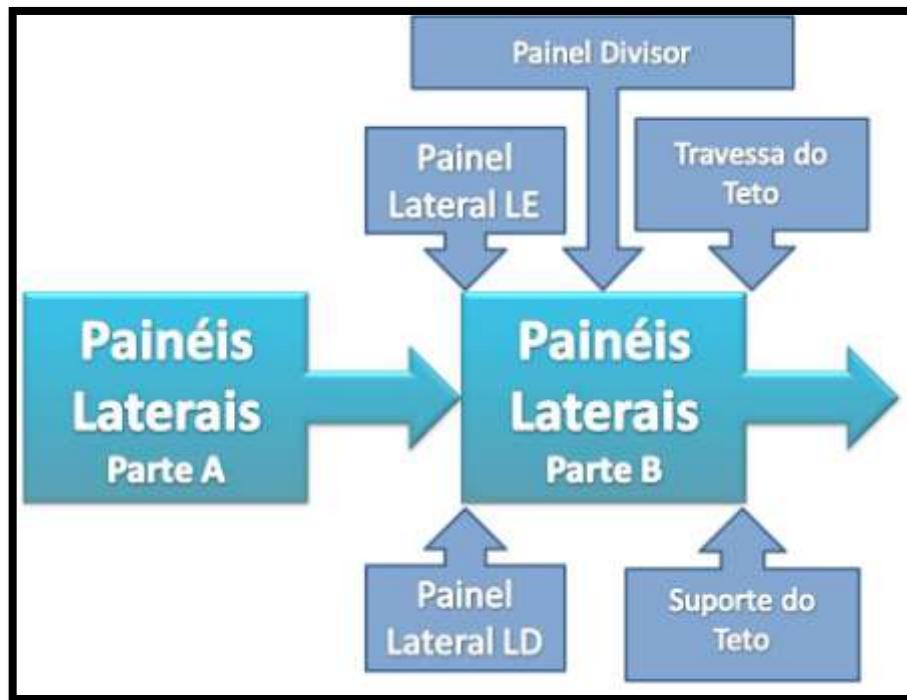


Figura 20 - Exemplo de Aplicação - Painéis Laterais

4.2.6 Teto

A célula do Teto se divide em duas partes (Figura 21). Na Parte A, a peça *Painel do Teto* e duas unidades da peça *Braço de caixa de roda*, há três processos de soldagem e um de aplicação de cola. Na Parte B não há adição de peças, somente o processo de soldagem. Cada uma dessas duas operações possui dois operadores. Ao final do processo, o produto é transportado por talha elétrica para uma unidade de reboque finalizando o trecho da linha de produção do nosso exemplo.

Por razões de segurança, todos os ciclos possuem a ação de acionamento simultâneo através de botoeiras por dois ou mais operadores para fixação e liberação das peças no dispositivo por meio de um acionamento pneumático ou habilitação para transporte automático.

4.3 Passo a passo da aplicação do método

Considerando o procedimento para aplicação do método indicado no item 3.4, percebemos que o primeiro passo, partição do processo produtivo em partes individuais, já está contemplado na descrição da composição da nossa linha de produção em células produtivas, responsáveis por processos específicos de fabricação, conforme apresentado no item anterior. Para os próximos passos, vamos considerar os grafos do fluxo de atividades ou funcionalidades representados em PFS e os grafos em MFG para o nível de operação em cada célula que será a base isomórfica para obter-se o modelo final desenvolvido no software HPSim. Os grafos e o modelo final da célula Compartimento do Motor, já foram apresentados no capítulo 3.

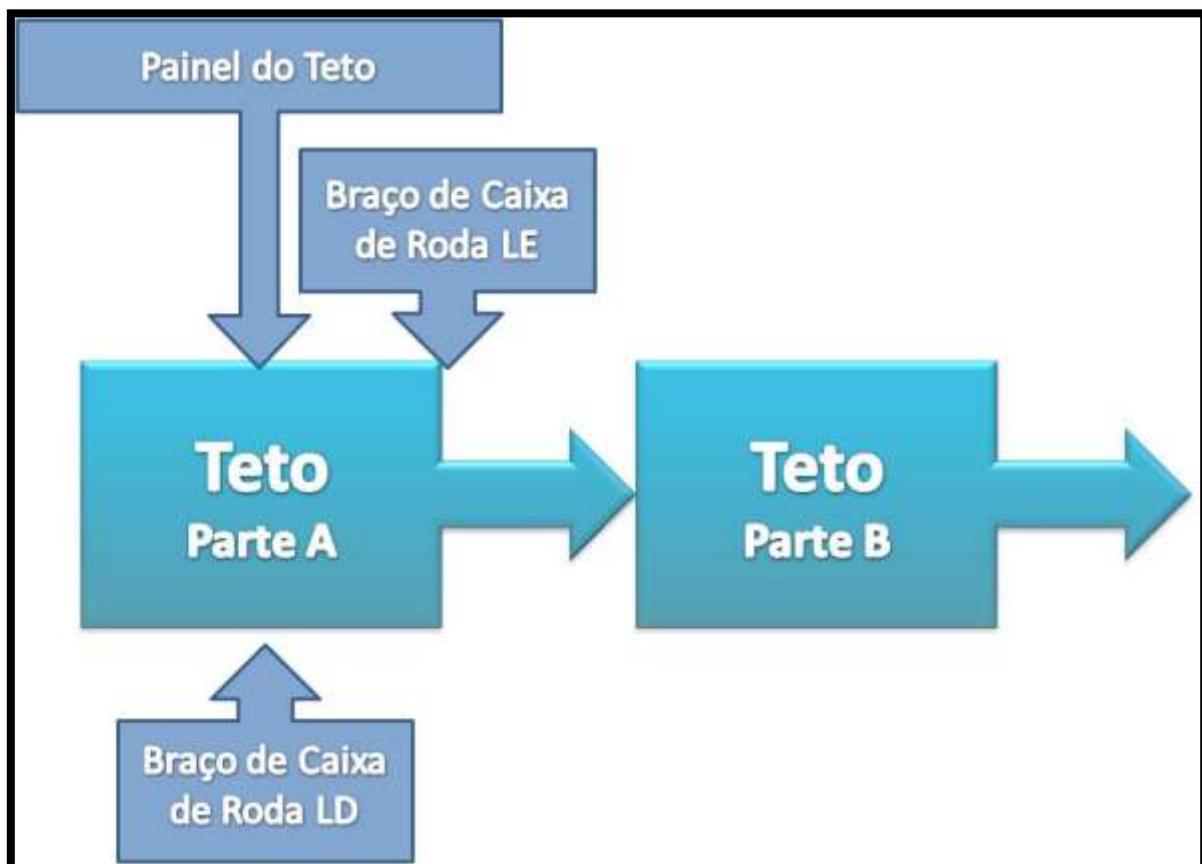


Figura 21 - Exemplo de Aplicação - Teto

Na Figura 22 apresentamos o grafo em PFS para a célula do Assoalho Dianteiro, que é uma parte fundamental para o sucesso do método. Neste ponto, definimos as funcionalidades da célula produtiva.

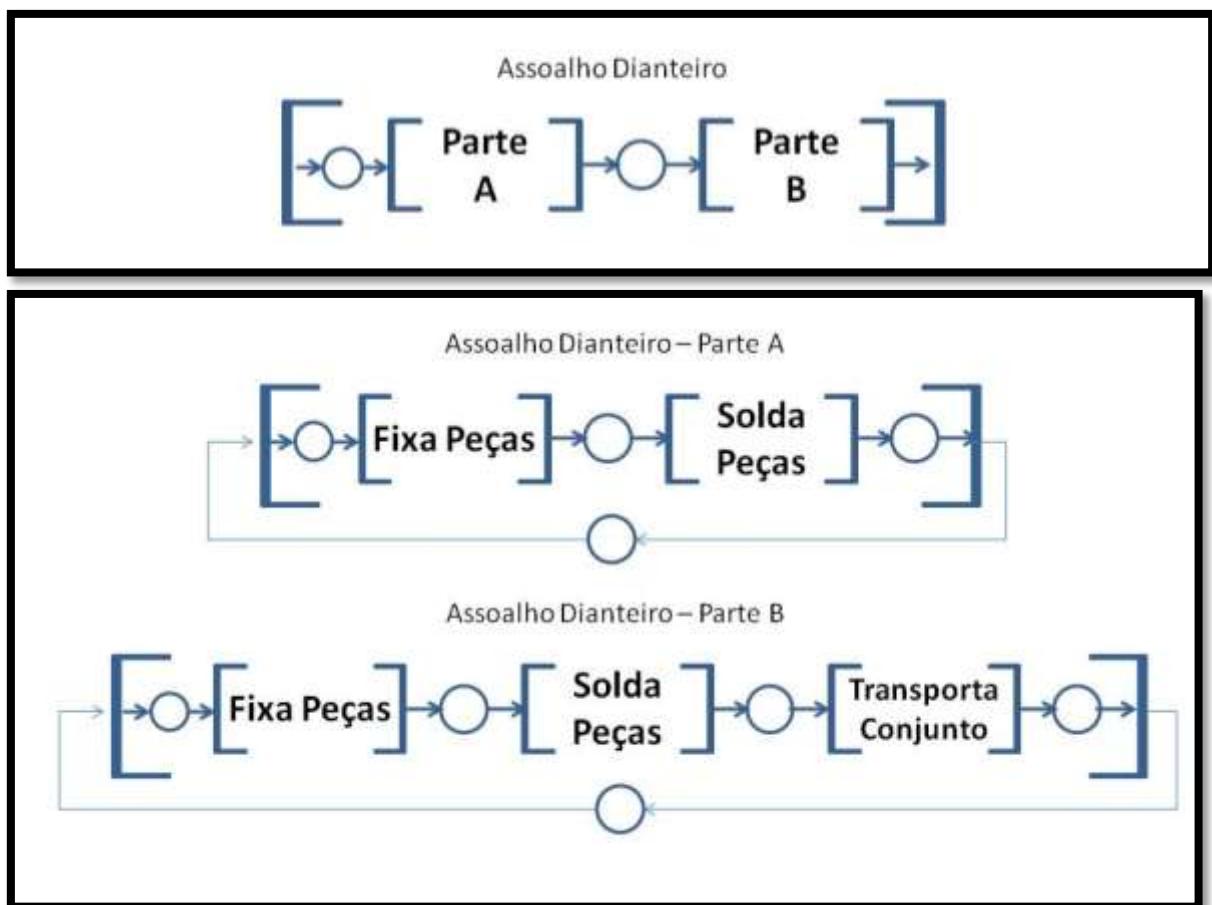


Figura 22 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS para Assoalho Dianteiro

Devido à variedade de peças envolvidas, a atividade *Fixa Peças*, pode ainda ser refinada em um novo nível de funcionalidades conforme indicado na Figura 23 (Parte A) e na Figura 24 (Parte B).

Podemos perceber que cada funcionalidade possui sua particularidade e pode ser refinada em outros níveis de funcionalidade (Figura 23 e Figura 24) ou pode ser constituída somente de uma operação, como é o caso da funcionalidade Transporta Conjunto (Figura 29). Da Figura 25 à Figura 29, temos a representação do nível operacional em MFG.

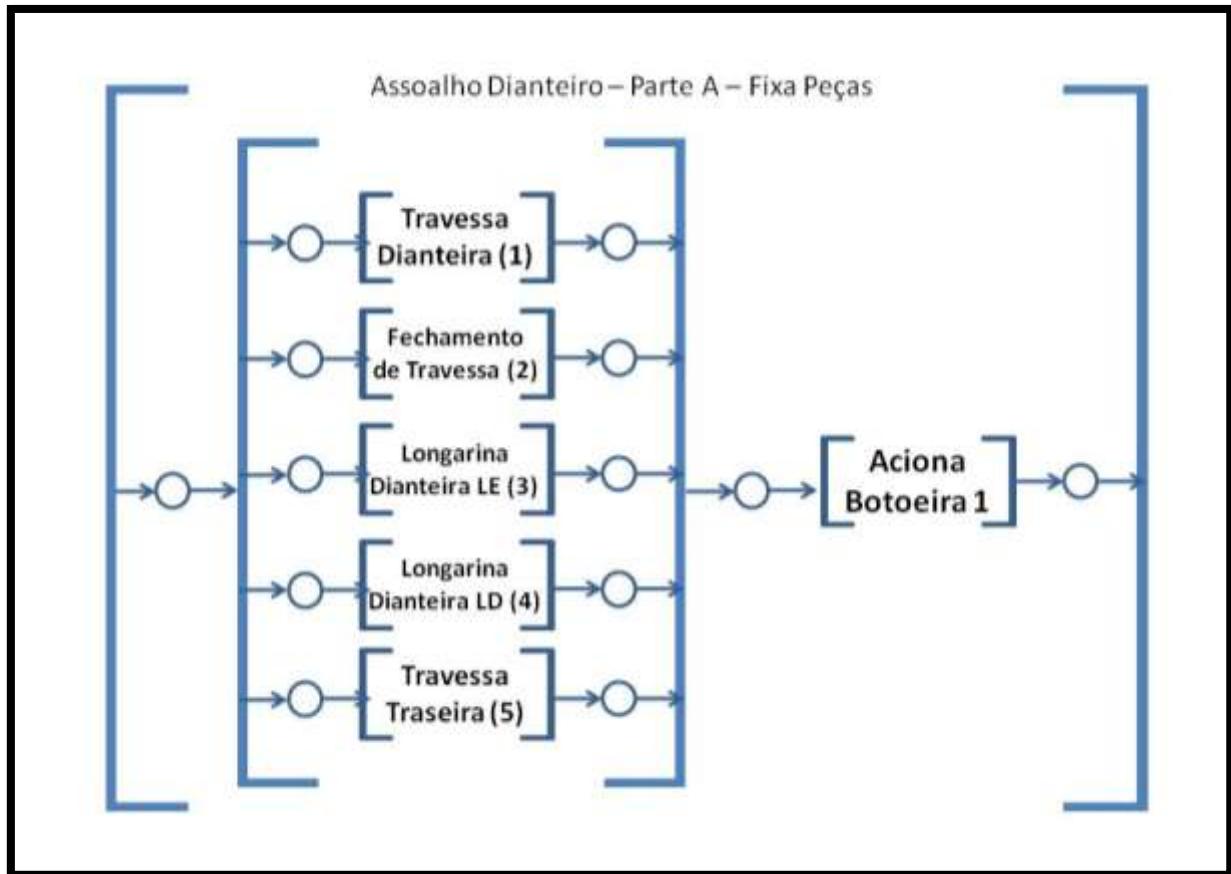


Figura 23 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Dianteiro - Parte A - Fixa Peças

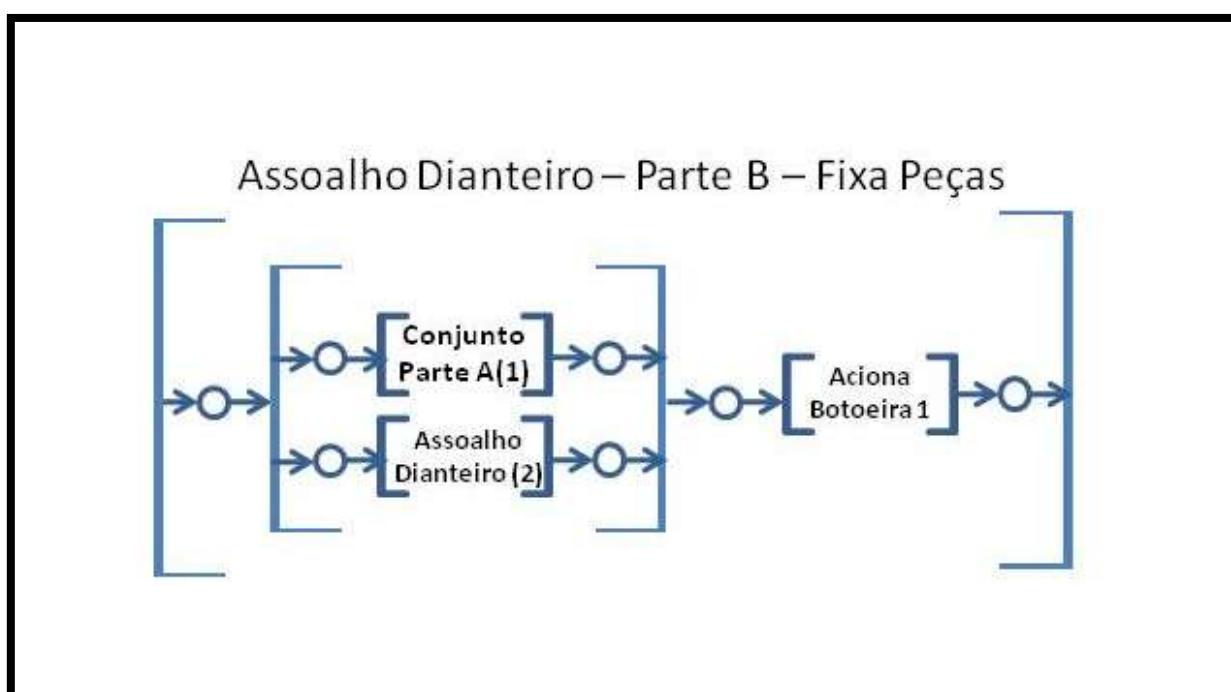


Figura 24 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Dianteiro - Parte B - Fixa Peças

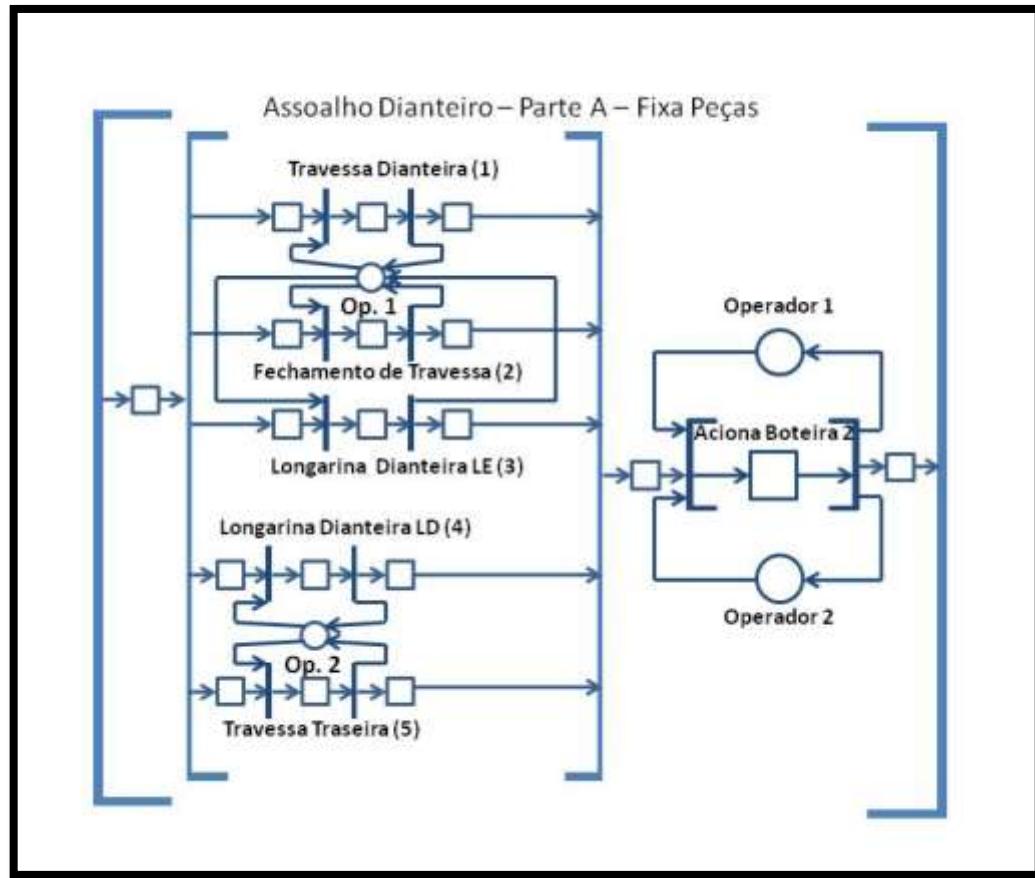


Figura 25 - Exemplo de Aplicação – Grafo MFG – Assoalho Dianteiro – Parte A – Fixa Peças

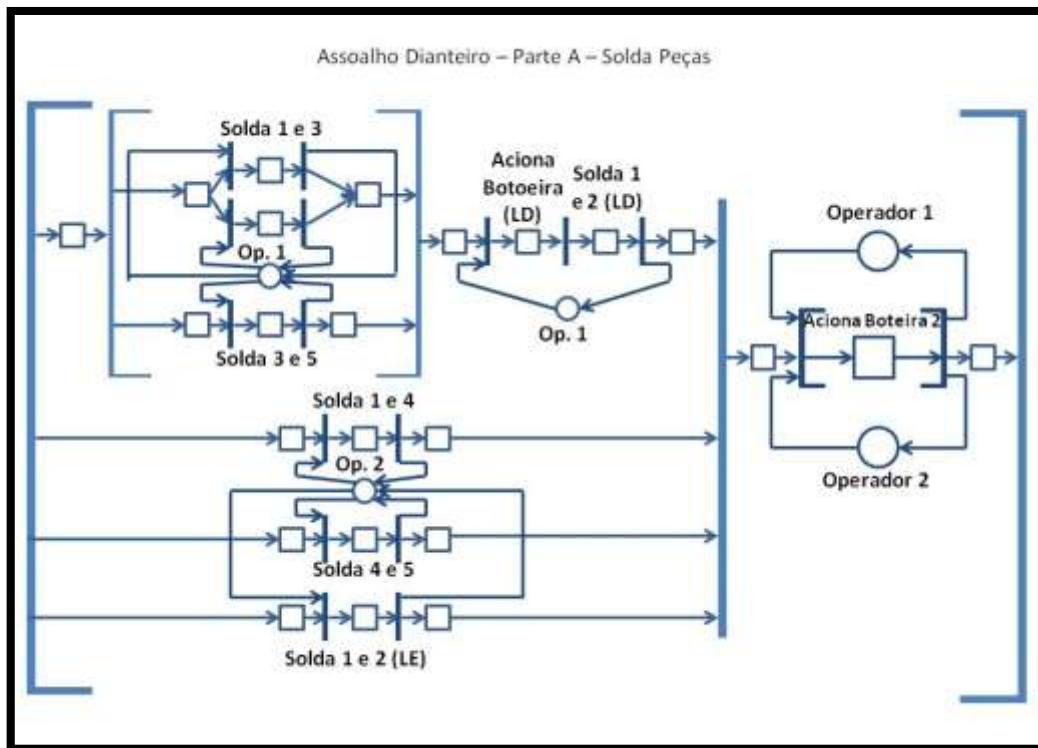


Figura 26 - Exemplo de Aplicação – Grafo MFG – Assoalho Dianteiro – Parte A – Solda Peças

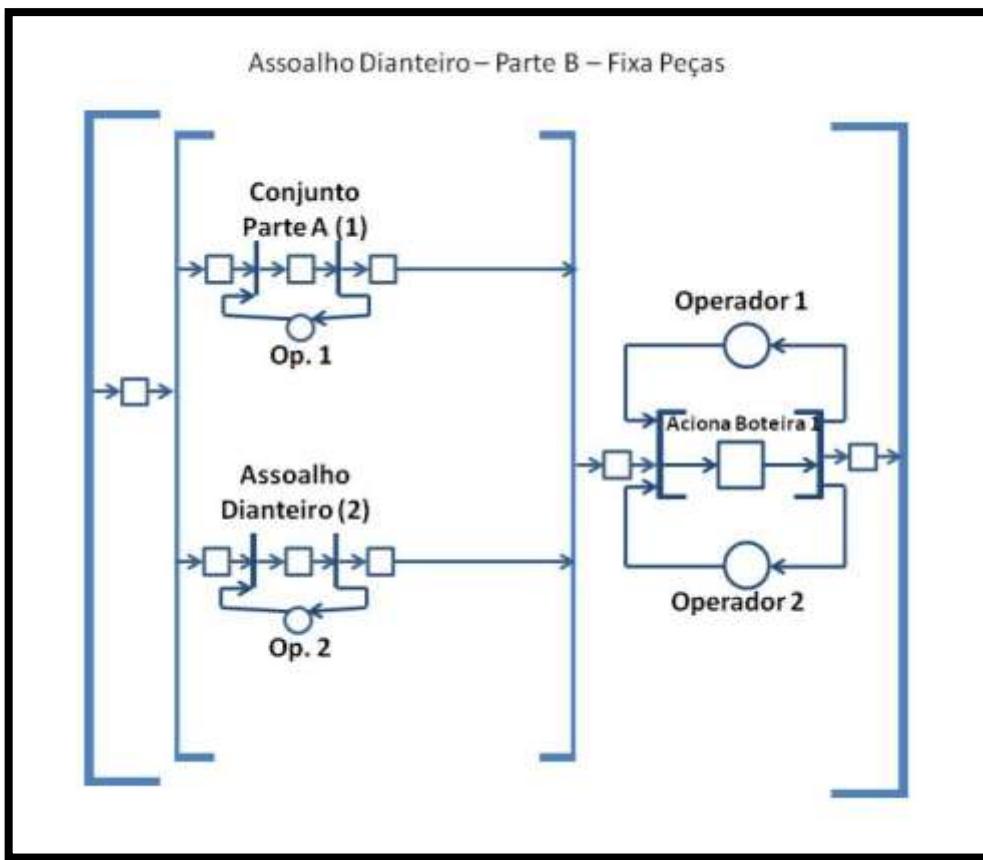


Figura 27 - Exemplo de Aplicação – Grafo MFG – Assoalho Dianteiro – Parte B – Fixa Peças

Por fim, temos o modelo final da célula do Assoalho Dianteiro desenvolvida em ambiente HPSim representado na Figura 30.

Esta célula apresenta um exemplo de comportamento em que se modela diferentes versões do mesmo produto. Por exemplo, peças diferenciadas para veículos com ou sem ar condicionado.

Em seguida analisamos a célula do Assoalho Traseiro aplicando-se conforme o procedimento determinado, isto é, primeiro com grafos PFS seguidos de grafos MFG para finalmente termos o modelo final, Figura 31 à Figura 35.

A célula do Assoalho Traseiro possui um modelo mais simples devido ao número reduzido de peças. Podemos perceber que o grau de autonomia de um operador humano é influenciado diretamente pela quantidade de peças e operações.

A partir do Assoalho Completo, temos o sistema de transporte que interligada as células. Podemos perceber pelo grafo PFS da célula na Figura 36 que os processos que são executados nas células estão representados em paralelo. Por sua vez, o

arco de realimentação indica que um novo ciclo de produção nas células só pode ser iniciado após o término da atividade em todas as demais células.

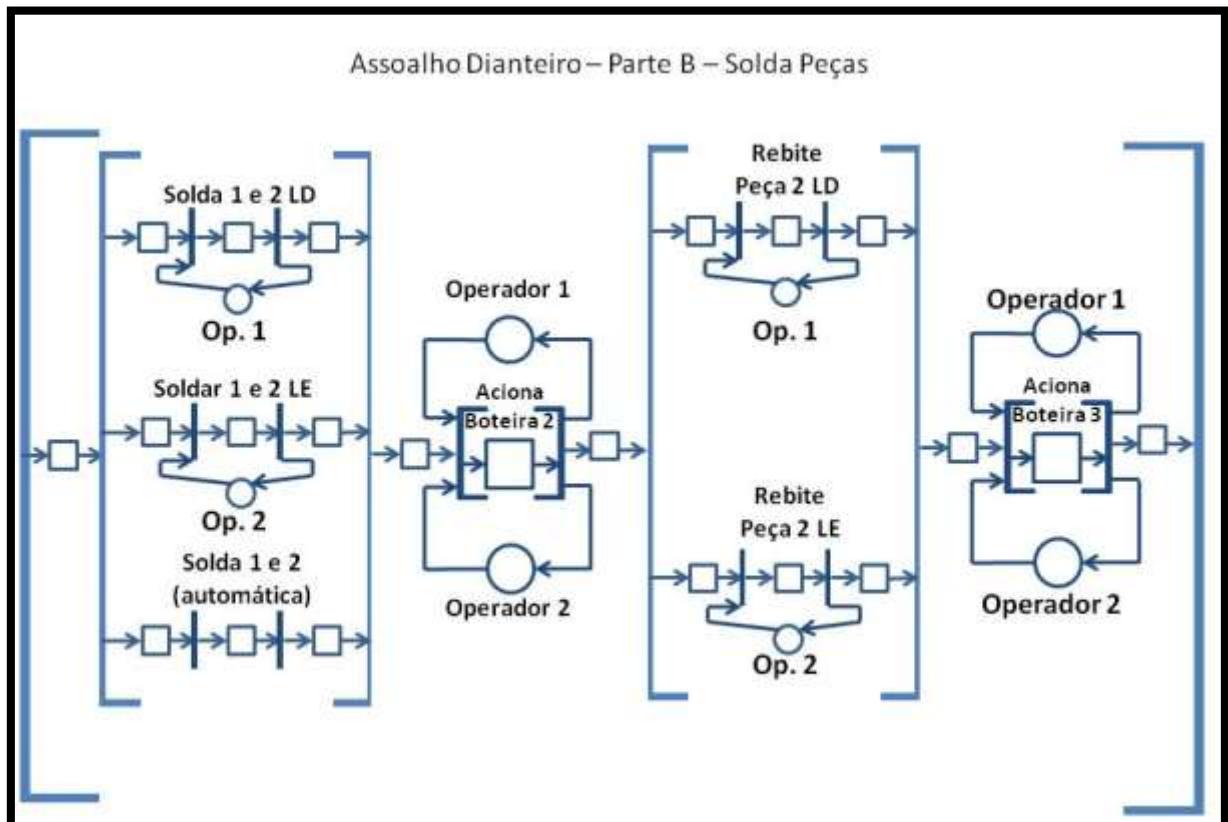


Figura 28 - Exemplo de Aplicação – Grafo MFG – Assoalho Dianteiro – Parte B – Solda Peças

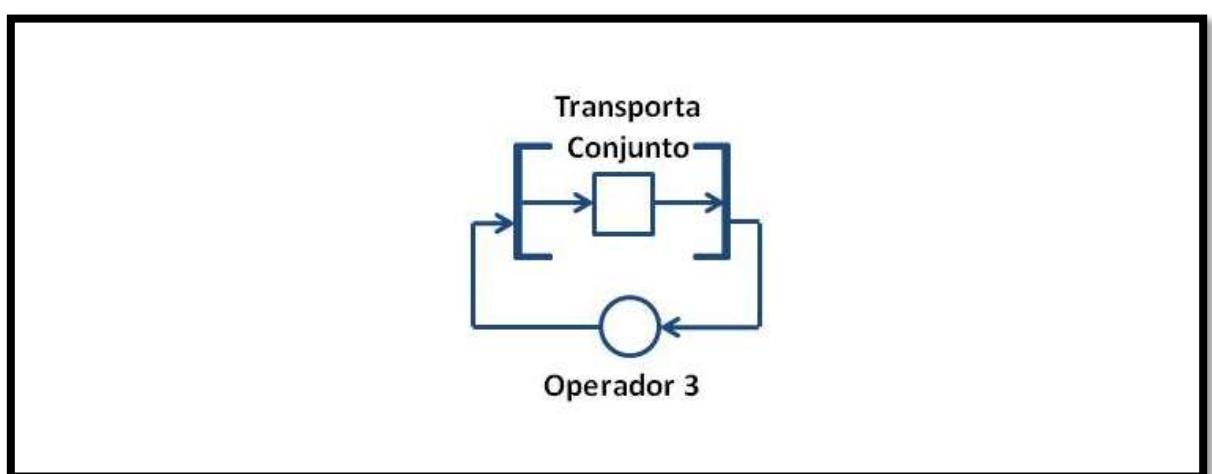


Figura 29 - Exemplo de Aplicação – Grafo MFG – Assoalho Dianteiro – Parte B – Transporta Conjunto

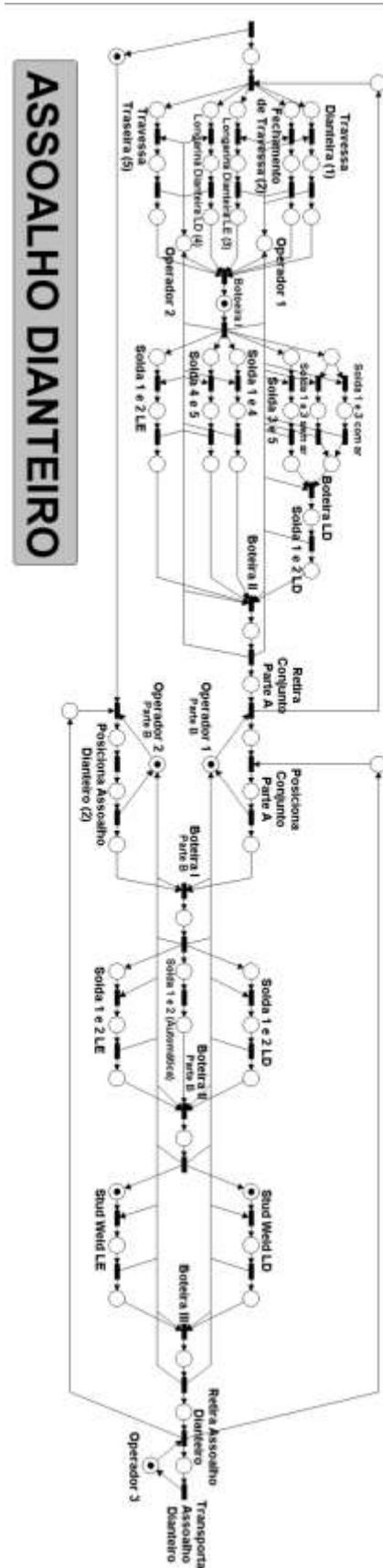


Figura 30 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Dianteiro - Modelo Final

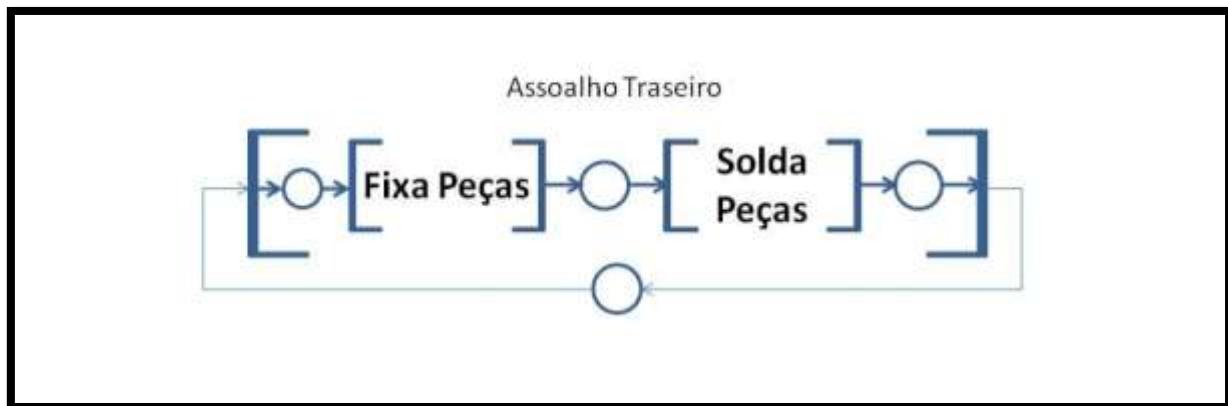


Figura 31 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Traseiro

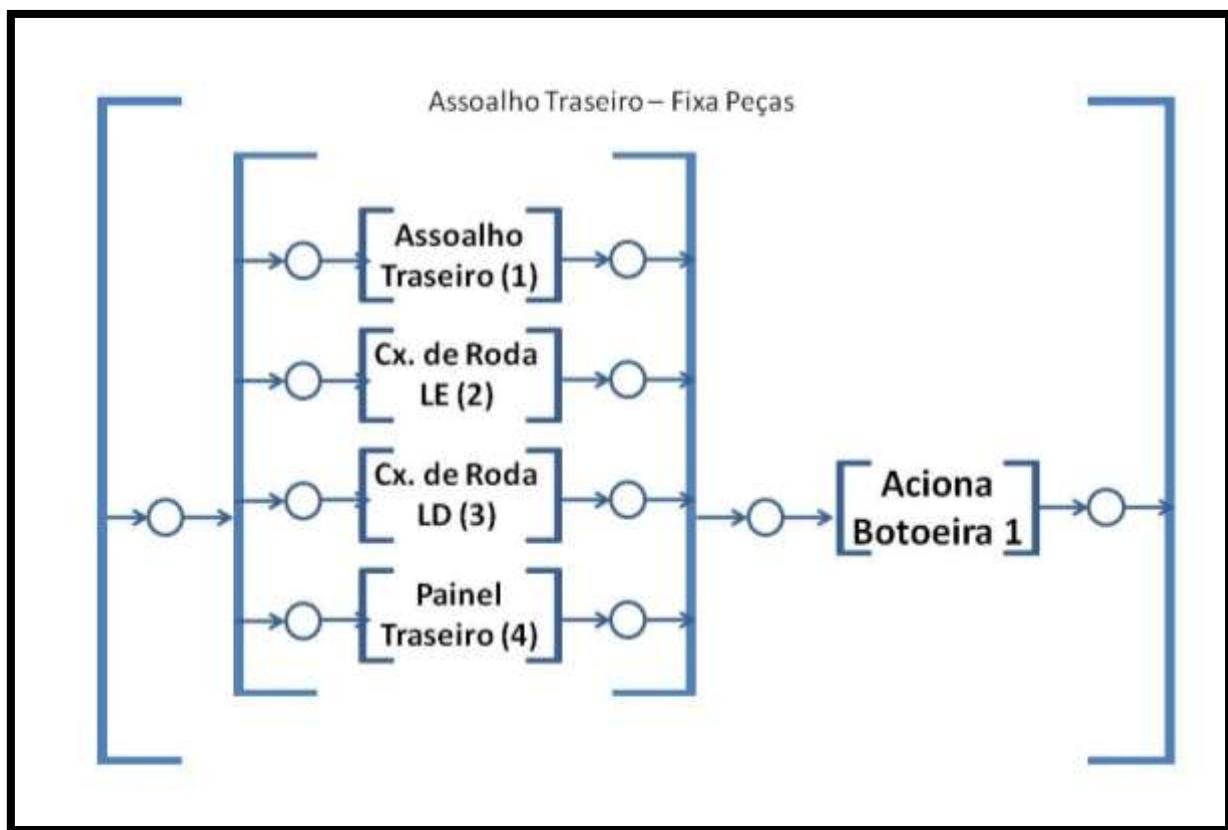


Figura 32 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Traseiro - Fixa Peças

Como as demais representações são refinamentos em diferentes níveis do grafo PFS apresentado para cada célula, o arco de realimentação não precisa ser replicado nos níveis de refinamento inferiores. Desta forma, conseguimos eliminar a complexidade desnecessária e, por consequência, a dificuldade de interpretação enfrentada no segundo método.

Apesar do sistema de transporte ser único para essas células, sua representação está indicada individualmente no começo de cada ciclo, explicitando o compartilhamento existente. Além disso, o modelo torna-se fidedigno para que seja feita análise de falhas, uma vez que estas podem ocorrer individualmente em cada célula.

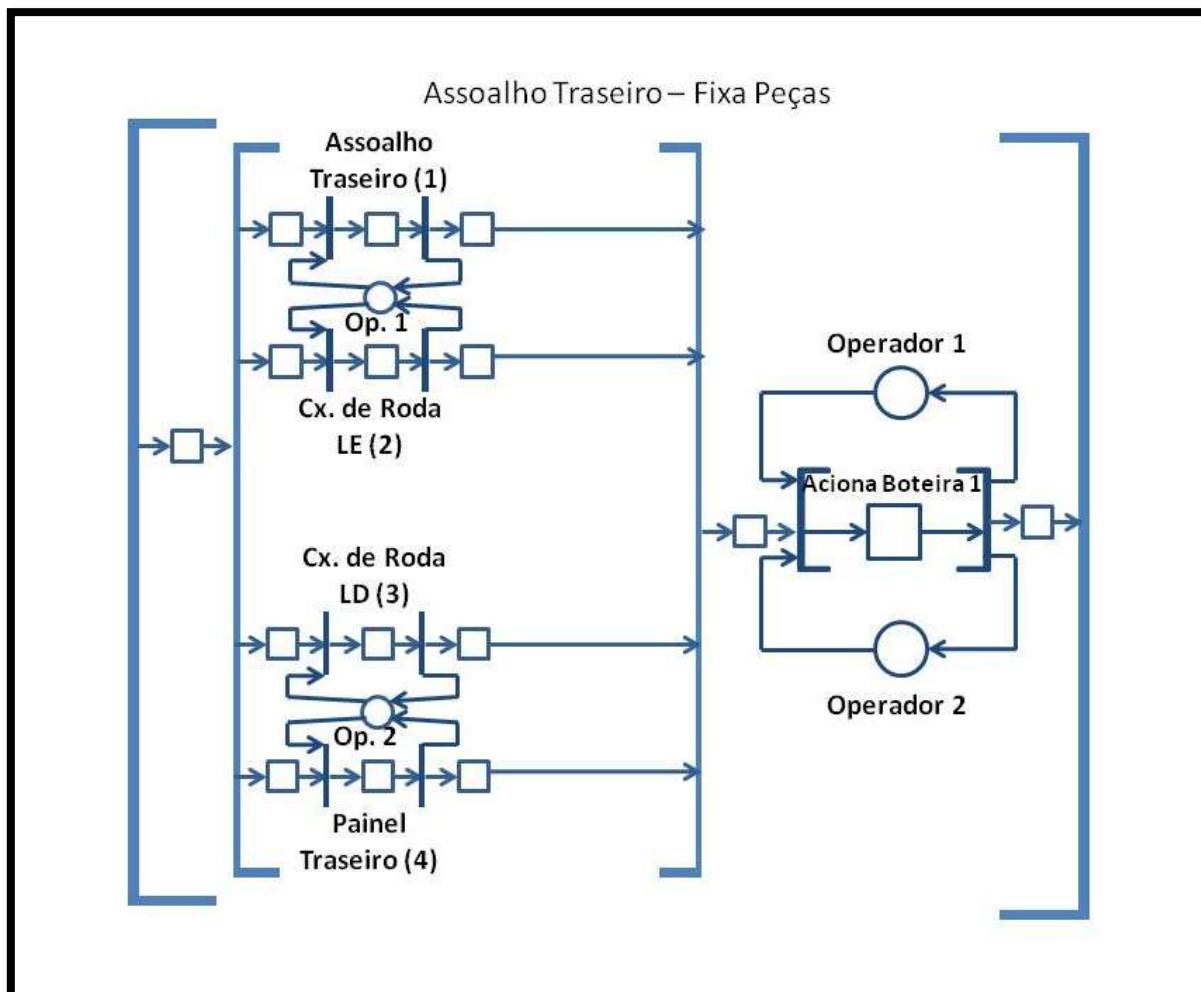


Figura 33 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Traseiro - Fixa Peças

Na Parte A do Assoalho Completo (Figura 36 à Figura 40), temos a introdução de peças que são o produto final de duas outras células produtivas já apresentadas, o Assoalho Traseiro e o Assoalho Dianteiro, assim como na Parte B (Figura 41 à Figura 46) temos a introdução da peça Compartimento do Motor. Como a primeira análise está focada em processos individuais, neste ponto não representamos a relação entre essas células produtivas, deixando para ser contemplada no modelo geral final.

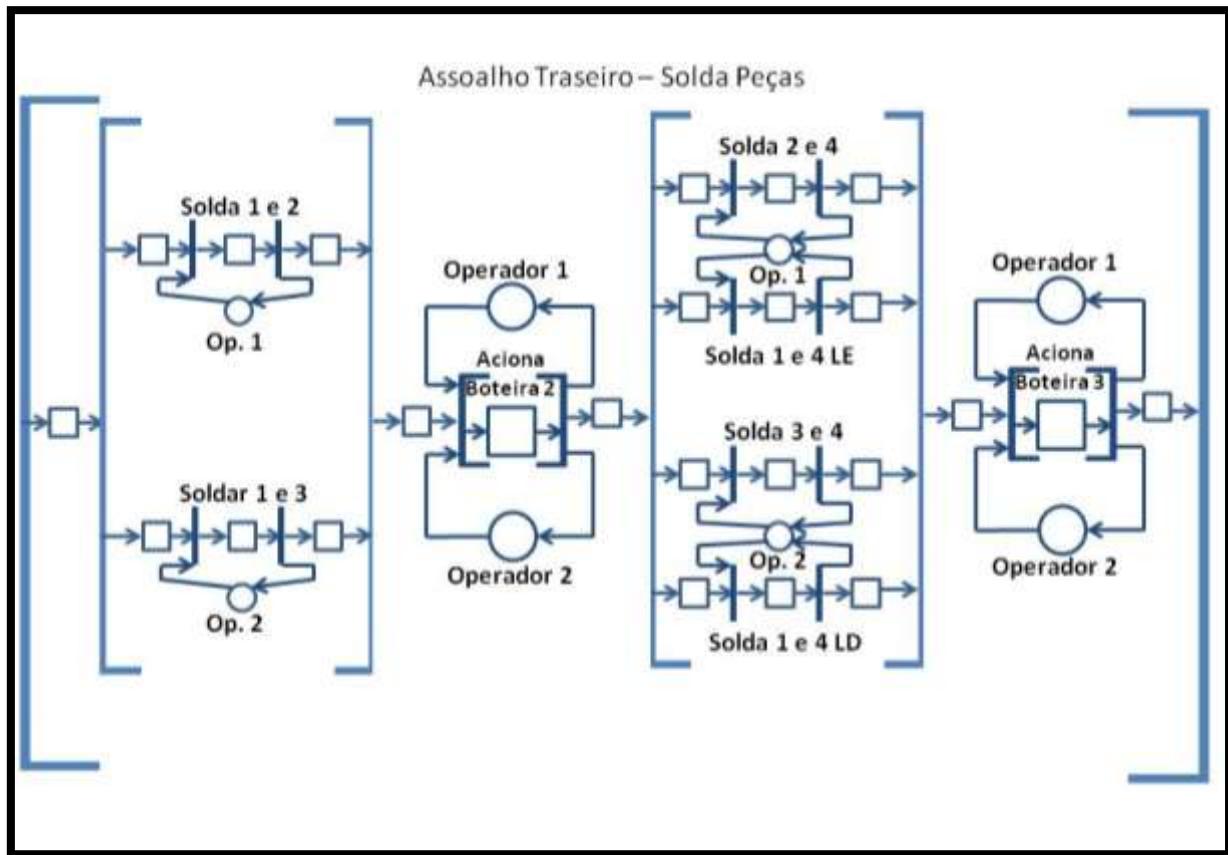


Figura 34 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Traseiro - Solda Peças

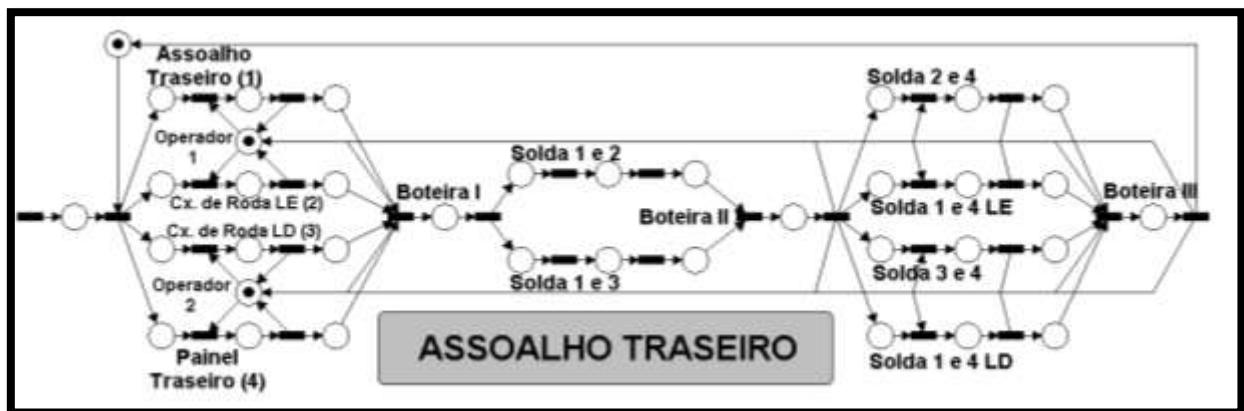


Figura 35 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Traseiro - Modelo Final

Na Parte C, temos representado a utilização de dispositivos que são utilizados para facilitar a fixação ou a soldagem de peças. Para a nossa análise, o manuseio desses dispositivos é interpretado como uma operação, assim como um posicionamento de peça ou uma operação de soldagem (Figura 47 à Figura 51)

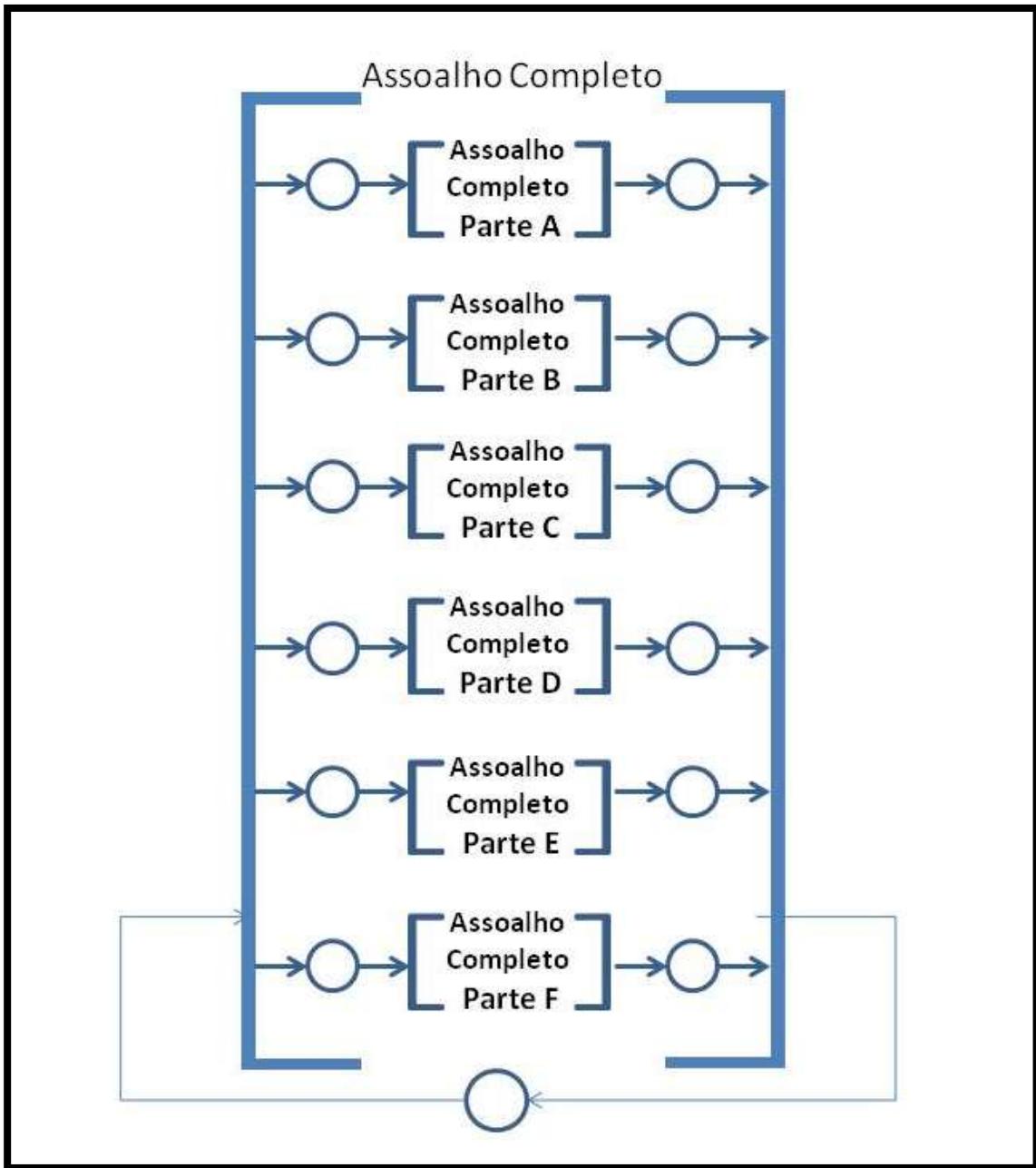


Figura 36 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo



Figura 37 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte A

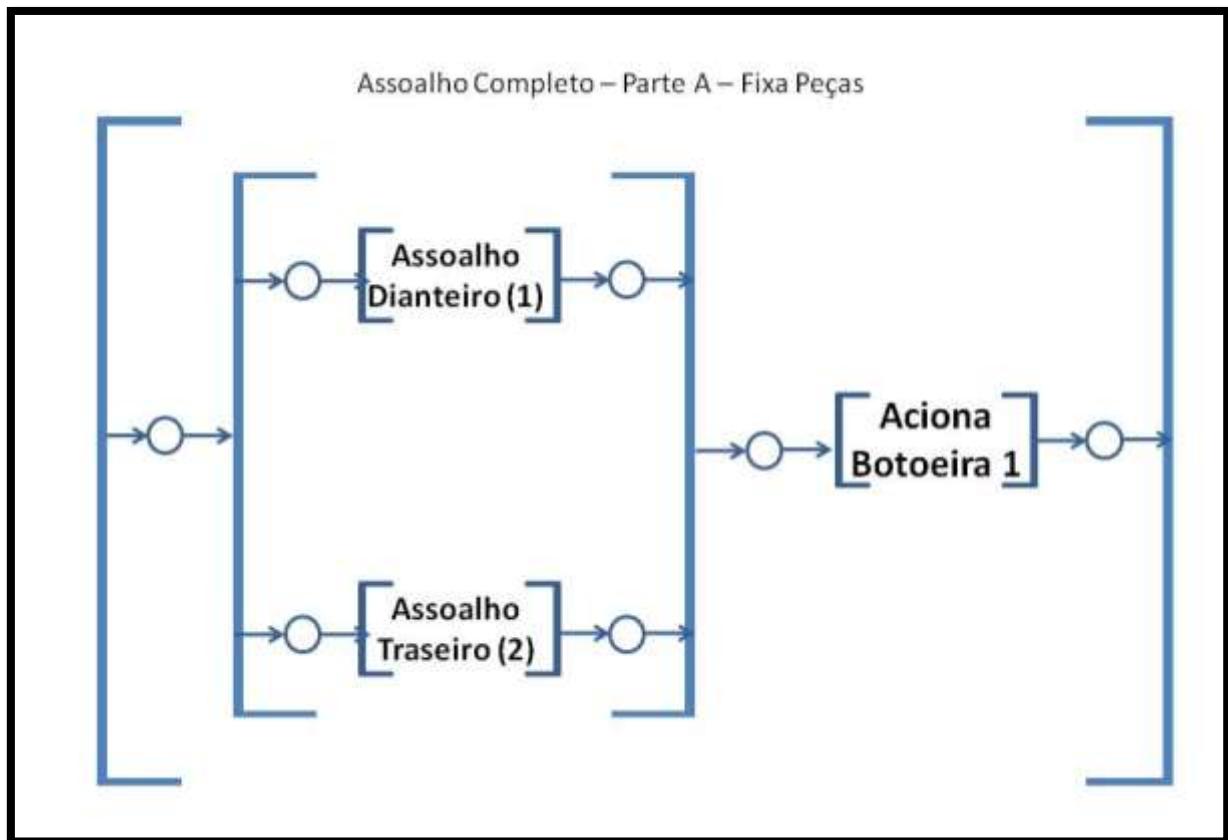


Figura 38 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte A - Fixa Peças

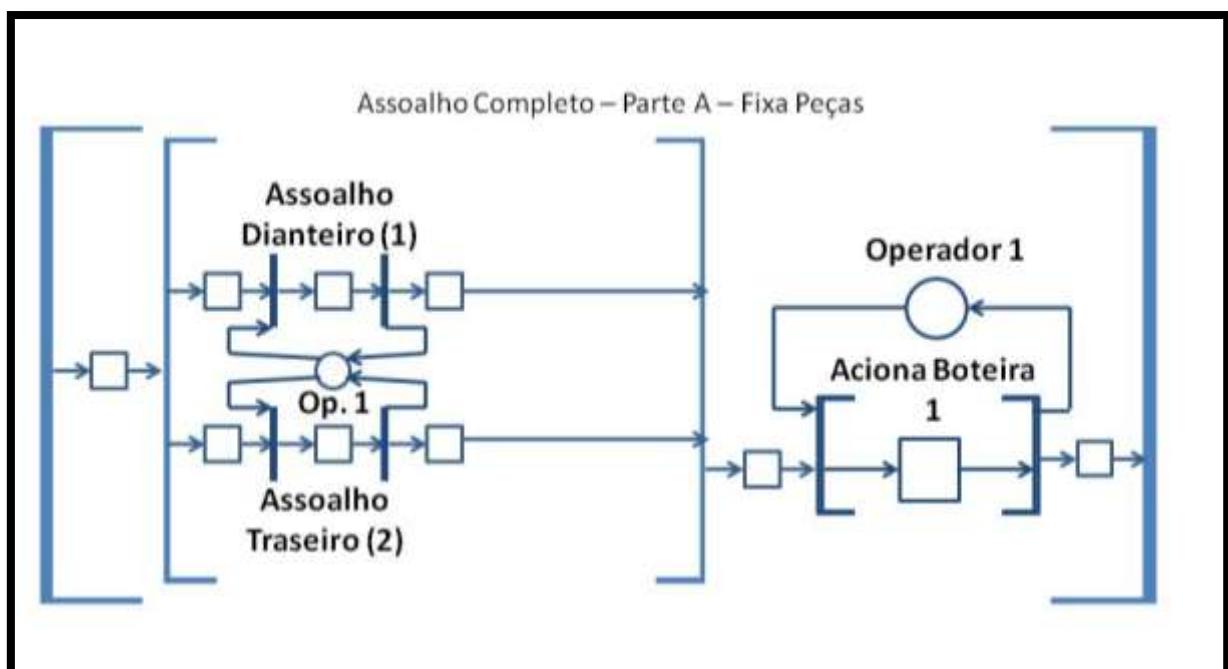


Figura 39 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte A - Fixa Peças

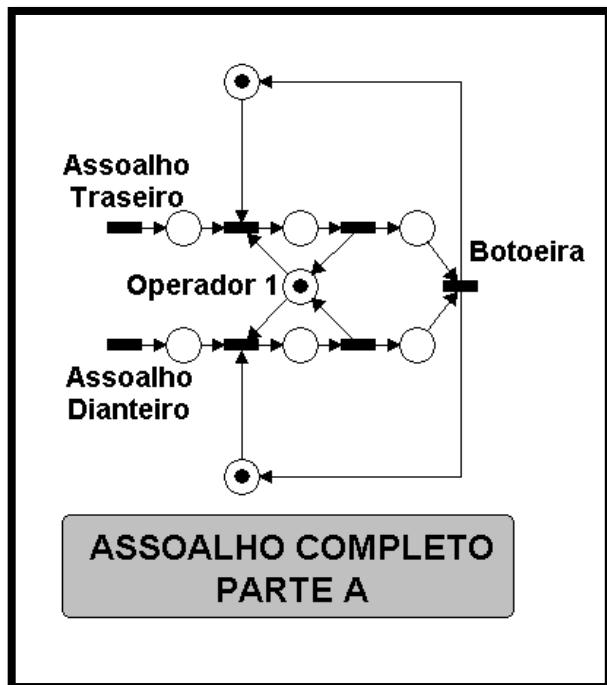


Figura 40 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo - Parte A - Modelo Final

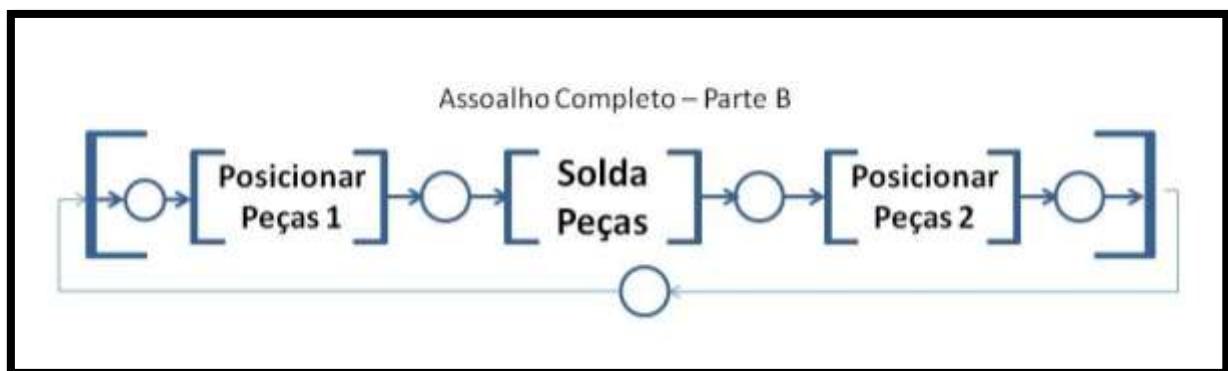


Figura 41 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte B

A Parte D tem a sua representação demasiadamente simples, isto porque o foco deste trabalho são as operações humanas e sua interação com os agentes automáticos (Figura 52 à Figura 54). Como a Parte D se trata de uma célula automática, não nos interessa a quantidade de operações, tanto que será interpretada como uma única operação. O ciclo de operação de um robô de solda automático e sua otimização merecem um estudo específico que, apesar de poder ser bem desenvolvido utilizando ferramentas de modelagem discreta, não é abordado neste trabalho.

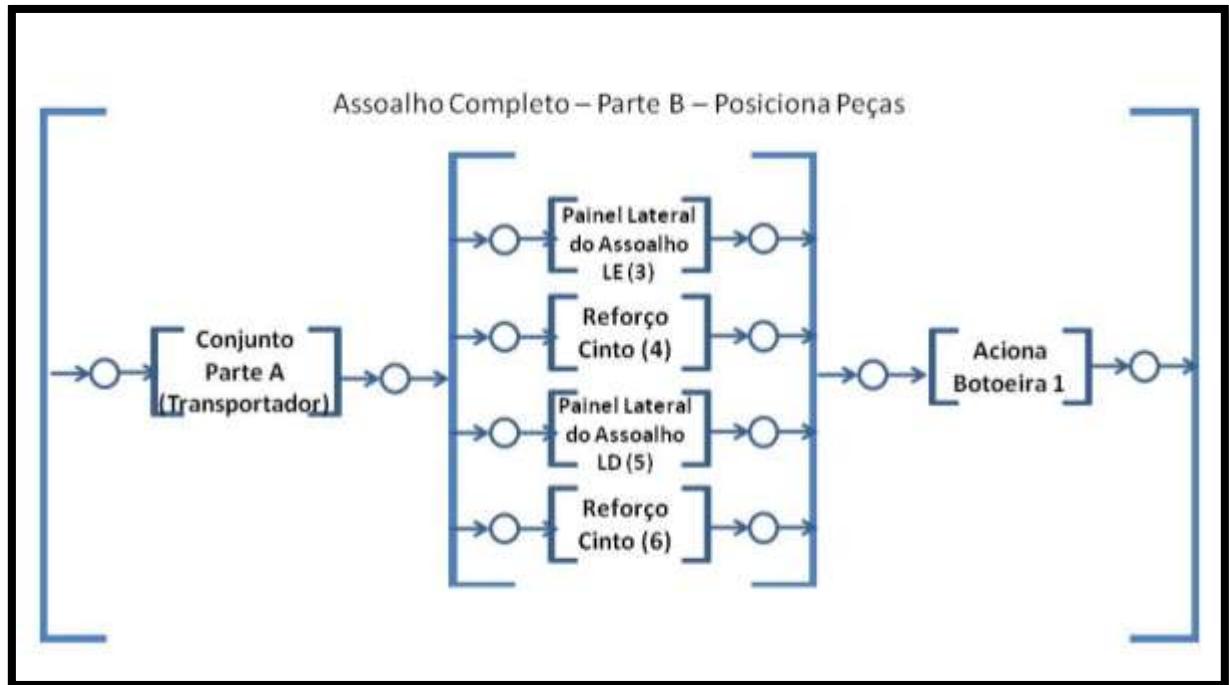


Figura 42 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte B - Posiciona Peças

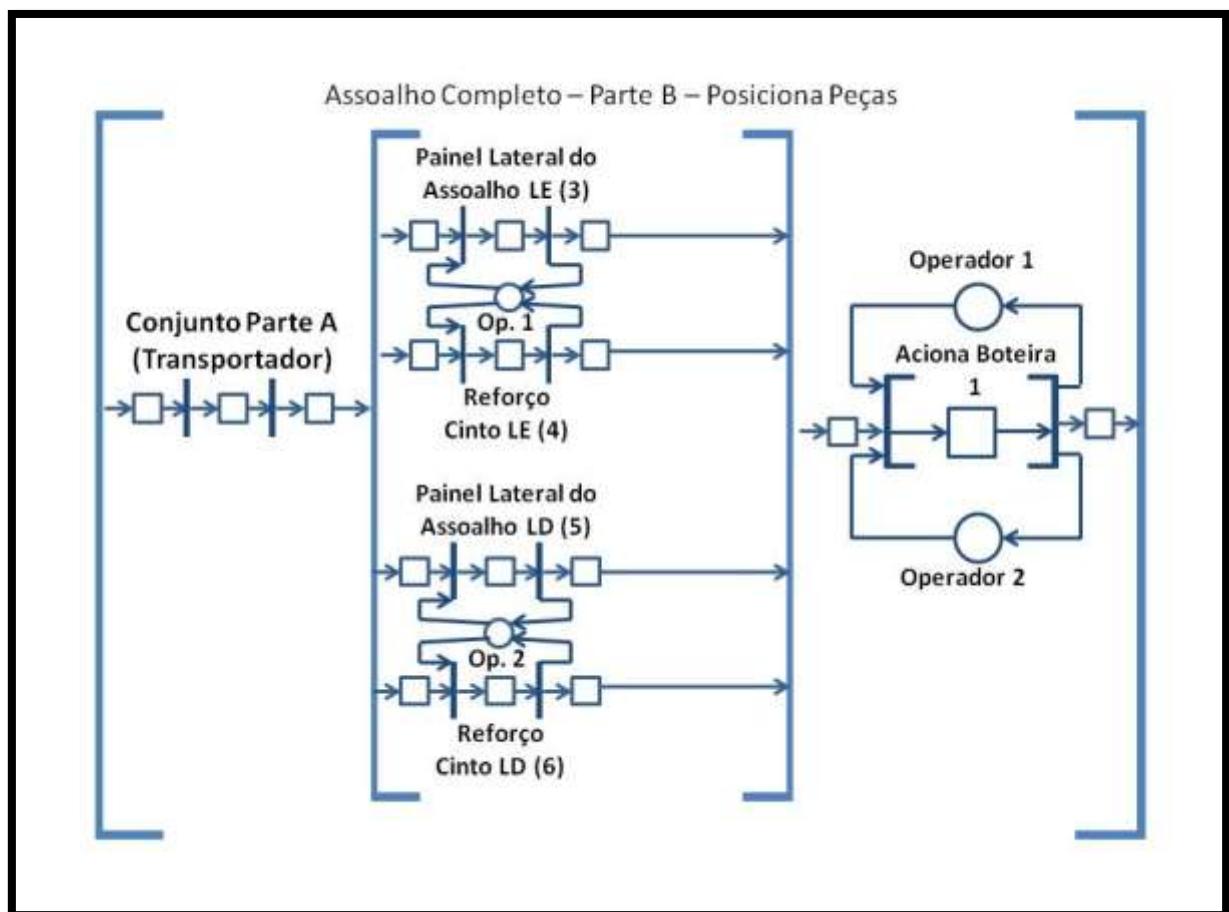


Figura 43 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte B - Posiciona Peças

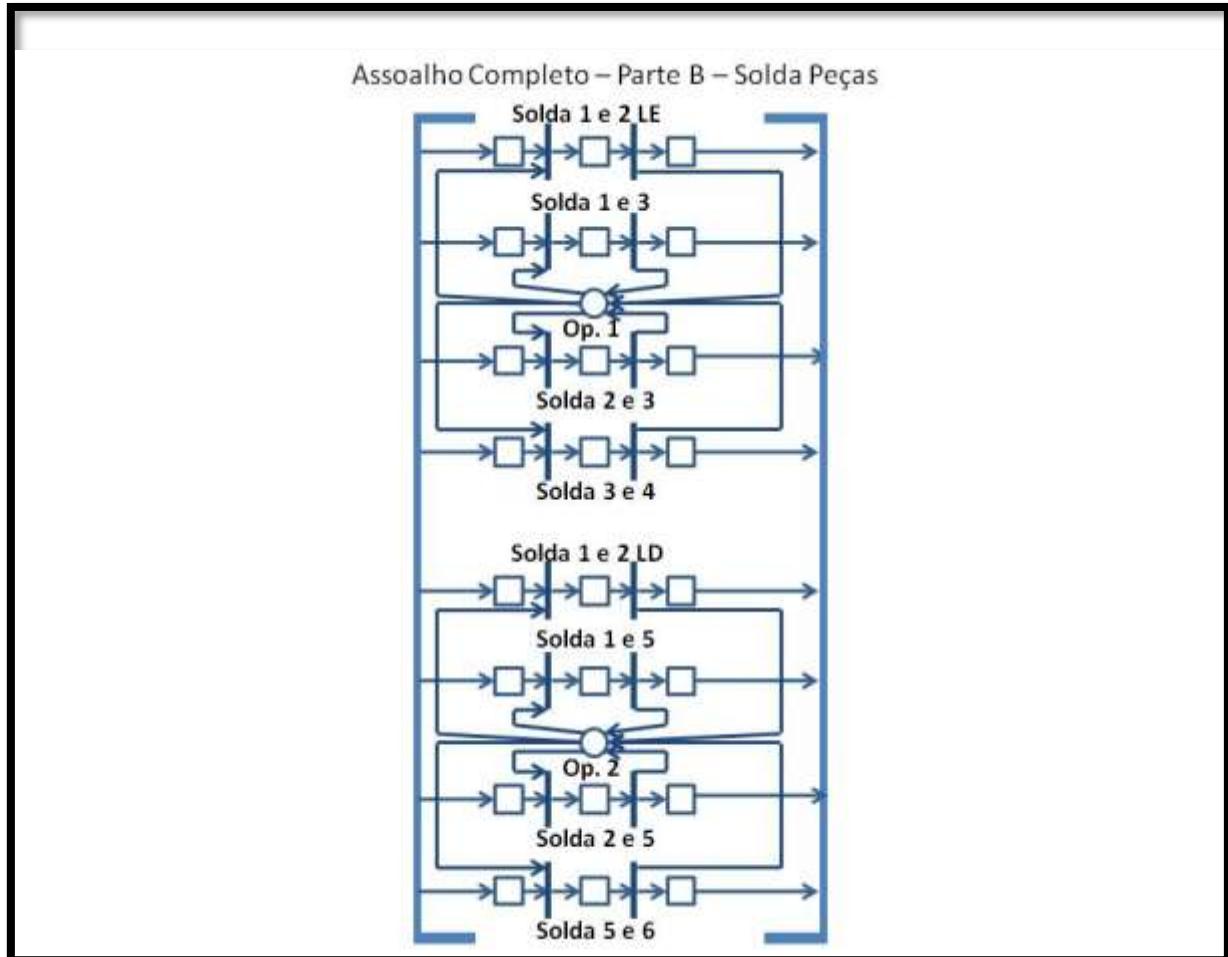


Figura 44 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte B - Solda Peças

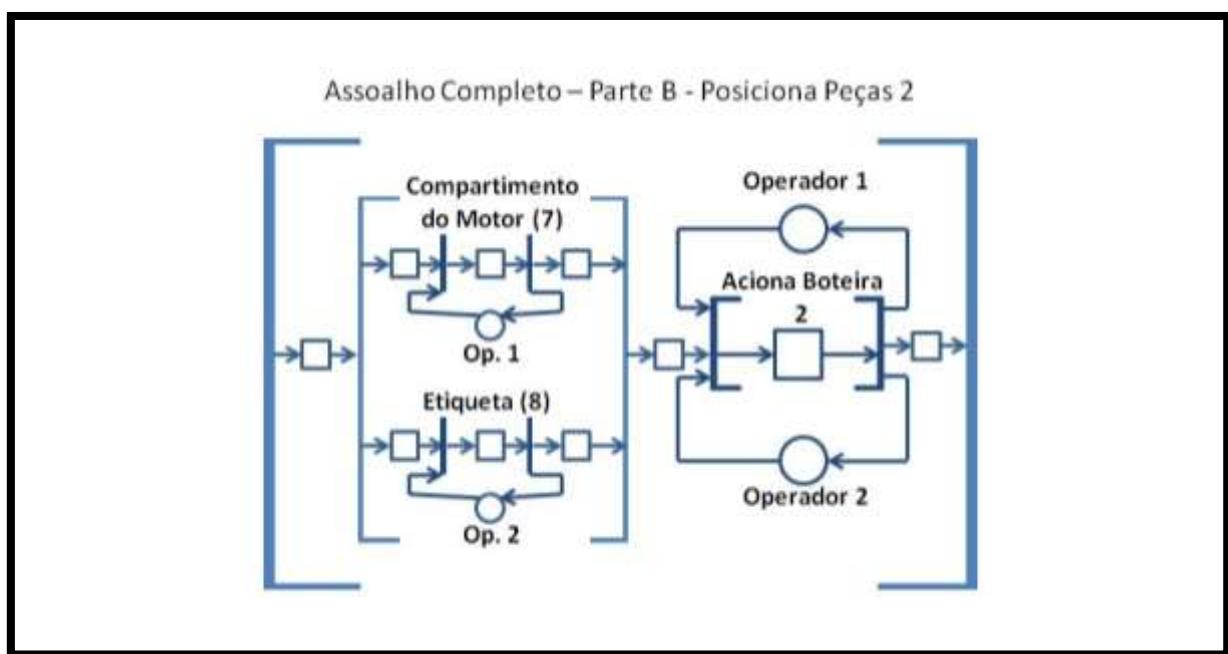


Figura 45 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte B - Posiciona Peças 2

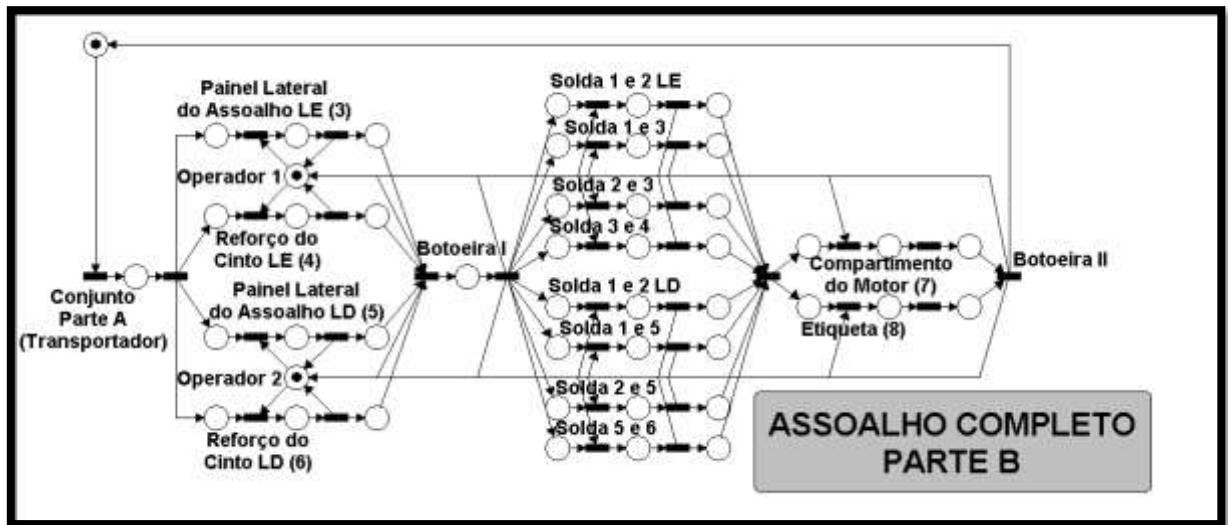


Figura 46 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo - Parte B - Modelo Final

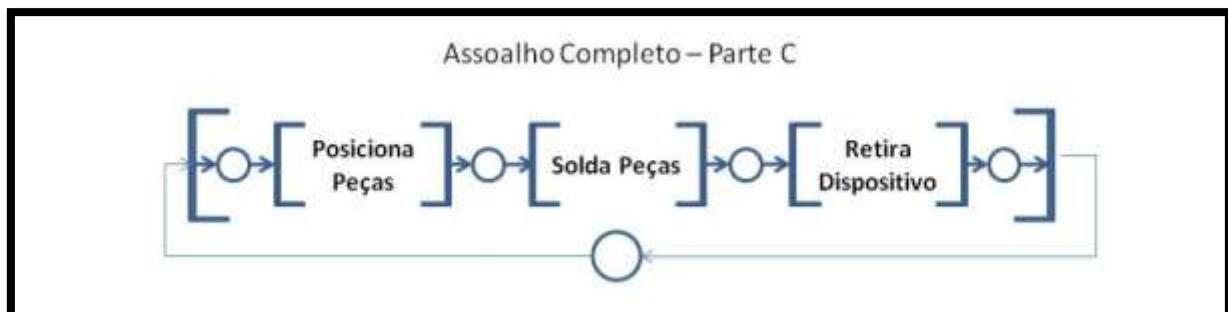


Figura 47 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte C

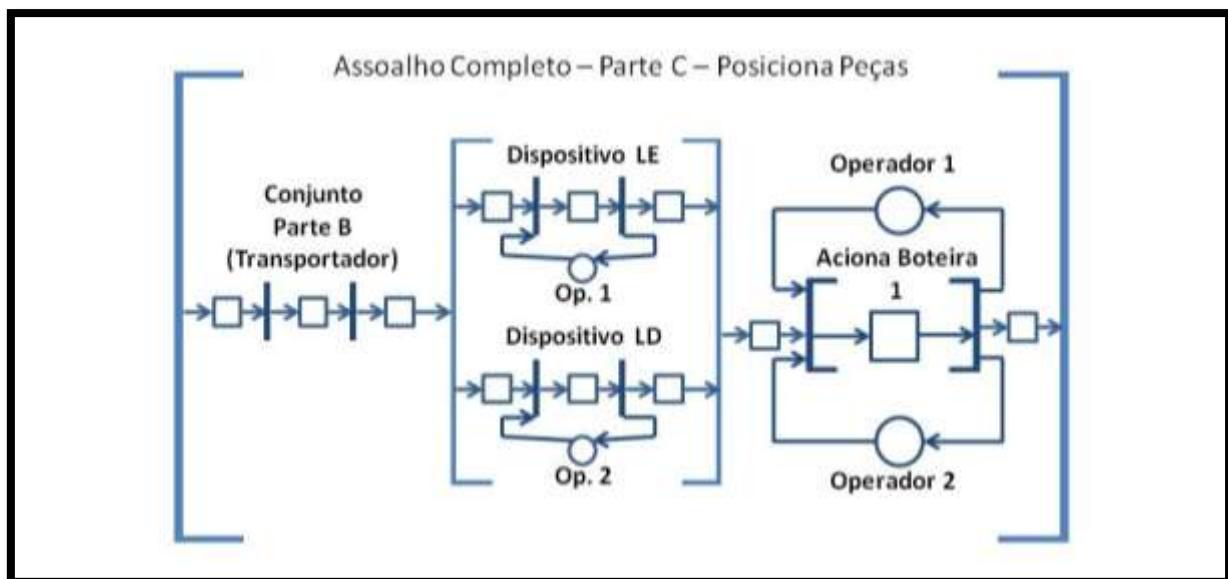


Figura 48 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte C - Posiciona Peças

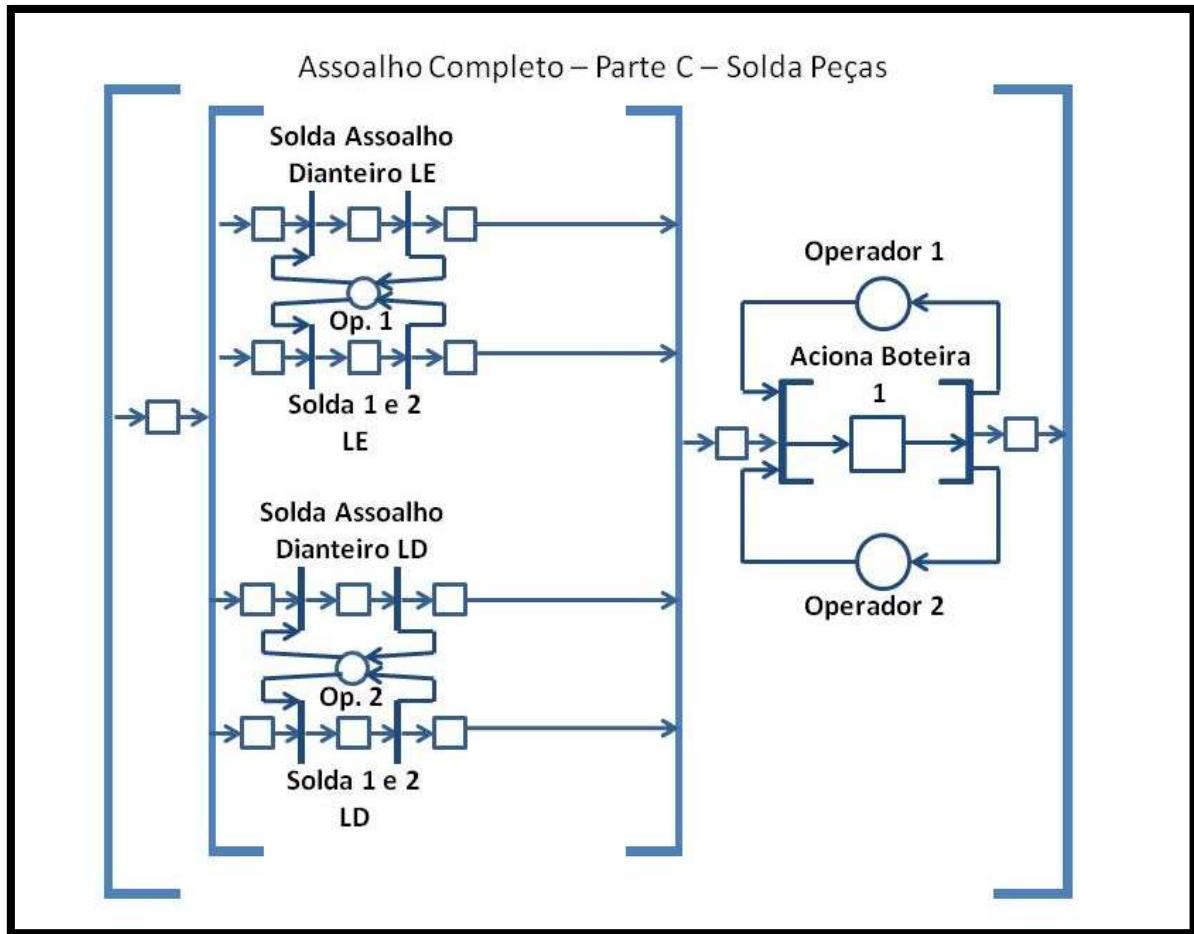


Figura 49 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte C - Solda Peças

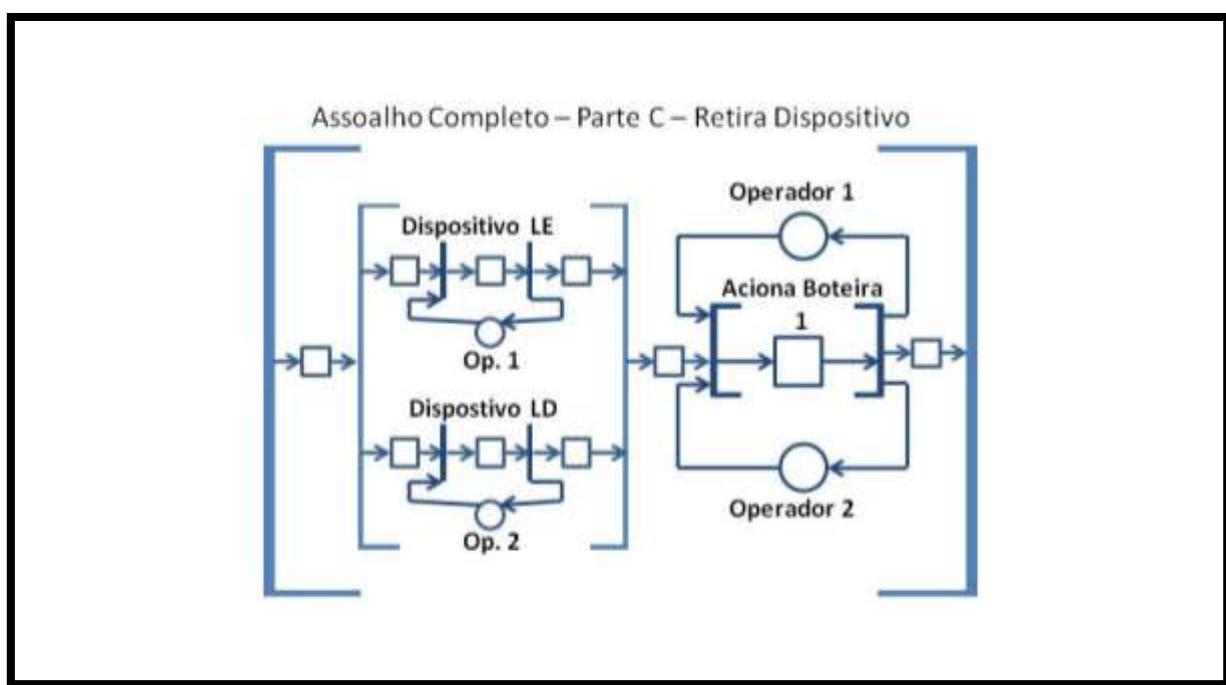


Figura 50 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte C - Retira Dispositivo

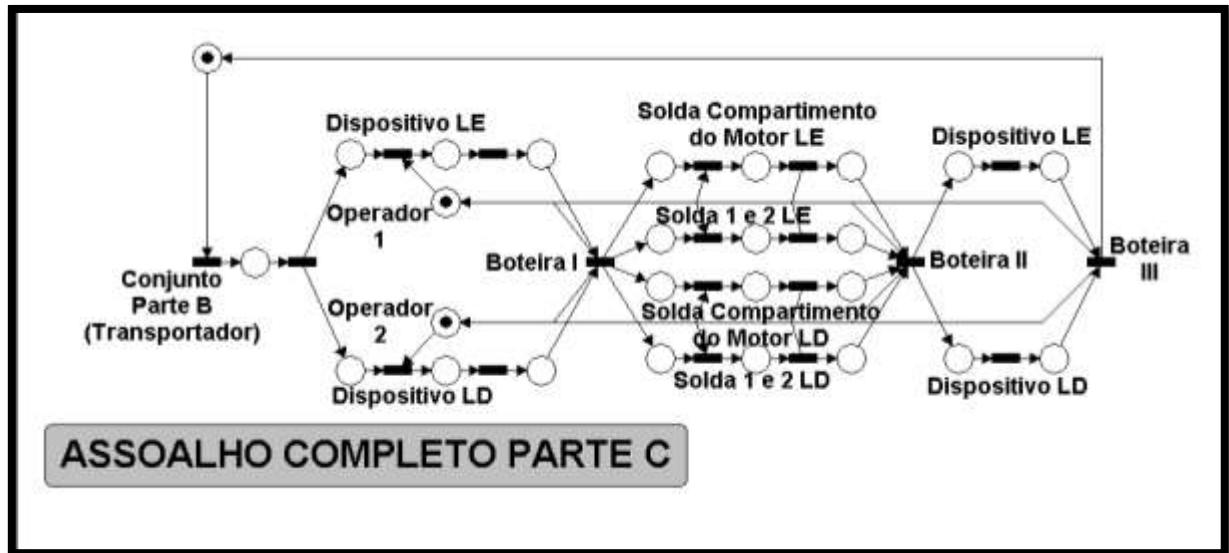


Figura 51 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo - Parte C - Modelo Final

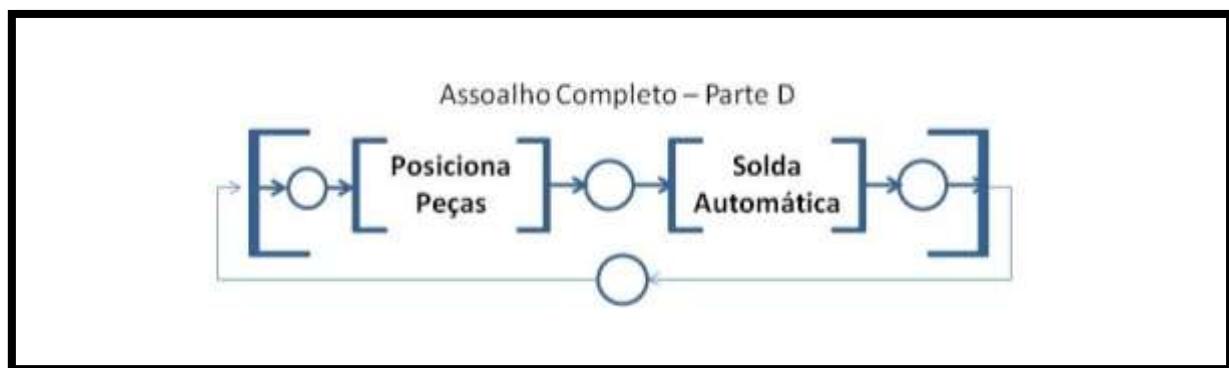


Figura 52 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte D

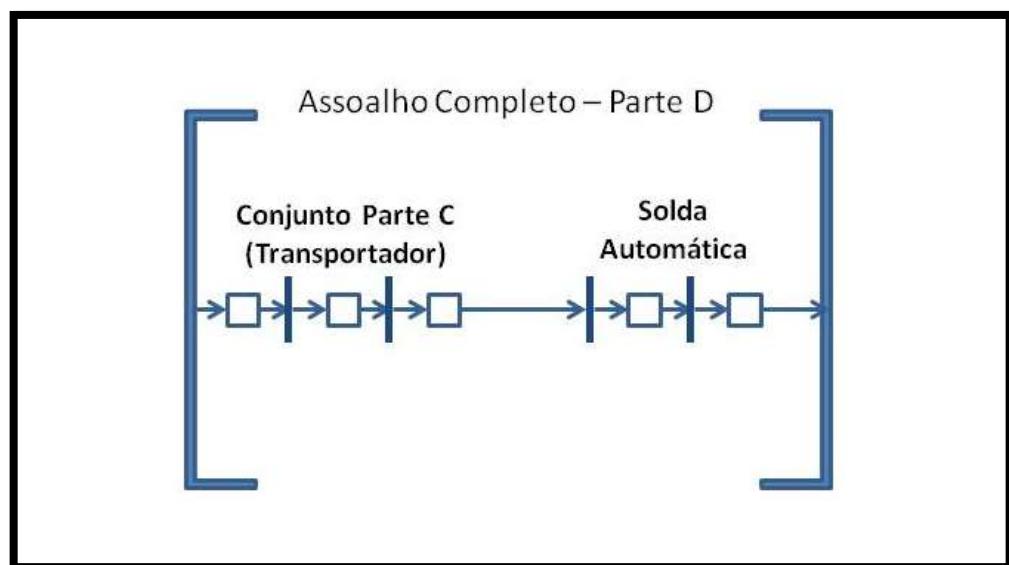


Figura 53 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte D

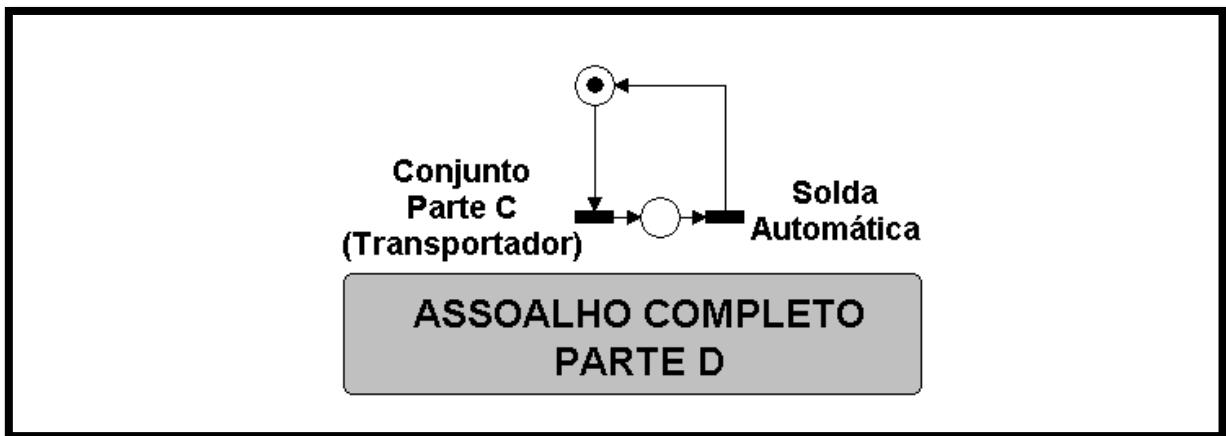


Figura 54 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo - Parte D - Modelo Final

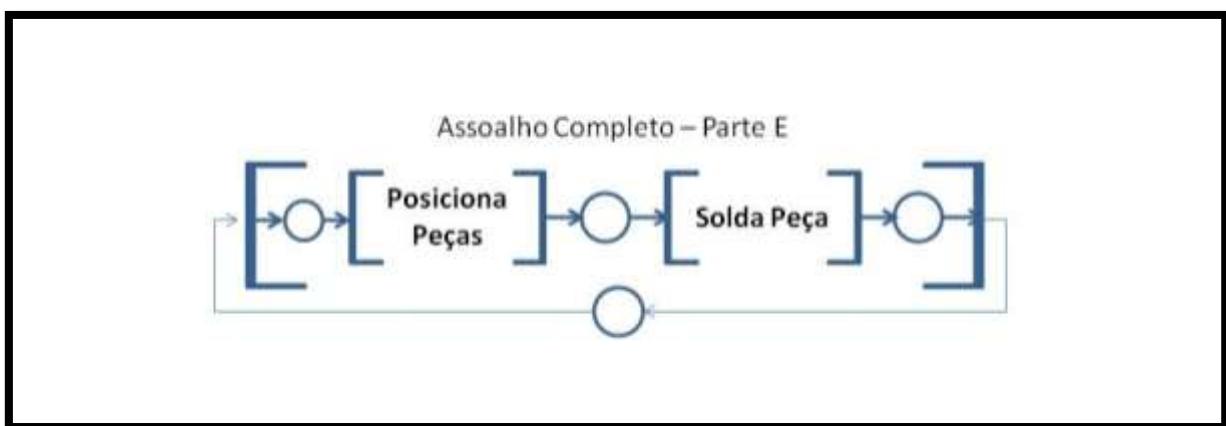


Figura 55 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte E

Nas Partes E e F há a representação de duas atividades de soldas, isto é, após a introdução de diversas peças ao produto, normalmente é necessária um reforço na solda do conjunto montado. Para o controle de execução das atividades e das operações são arbitradas as ocorrências de eventos. Portanto, supondo que um gargalo tenha sido identificado e um ponto de ociosidade também foi identificado, pode-se, após análise de viabilidade, transferir operações de solda, por exemplo, do gargalo para o ponto de ociosidade (Figura 55 à Figura 60).

A célula produtiva Painéis Laterais (Figura 61) é composta por duas partes com diferentes complexidades na representação. A Parte A (Figura 62 à Figura 64) prepara o conjunto para o recebimento de novas peças que serão inseridas na Parte B (Figura 65 à Figura 69). Neste ponto, podemos perceber que a complexidade da representação não está relacionada com a complexidade física da operação

realizada e sim pela quantidade de funcionalidades que agregam valor ao produto, por exemplo a inserção de novas peças ao conjunto final.

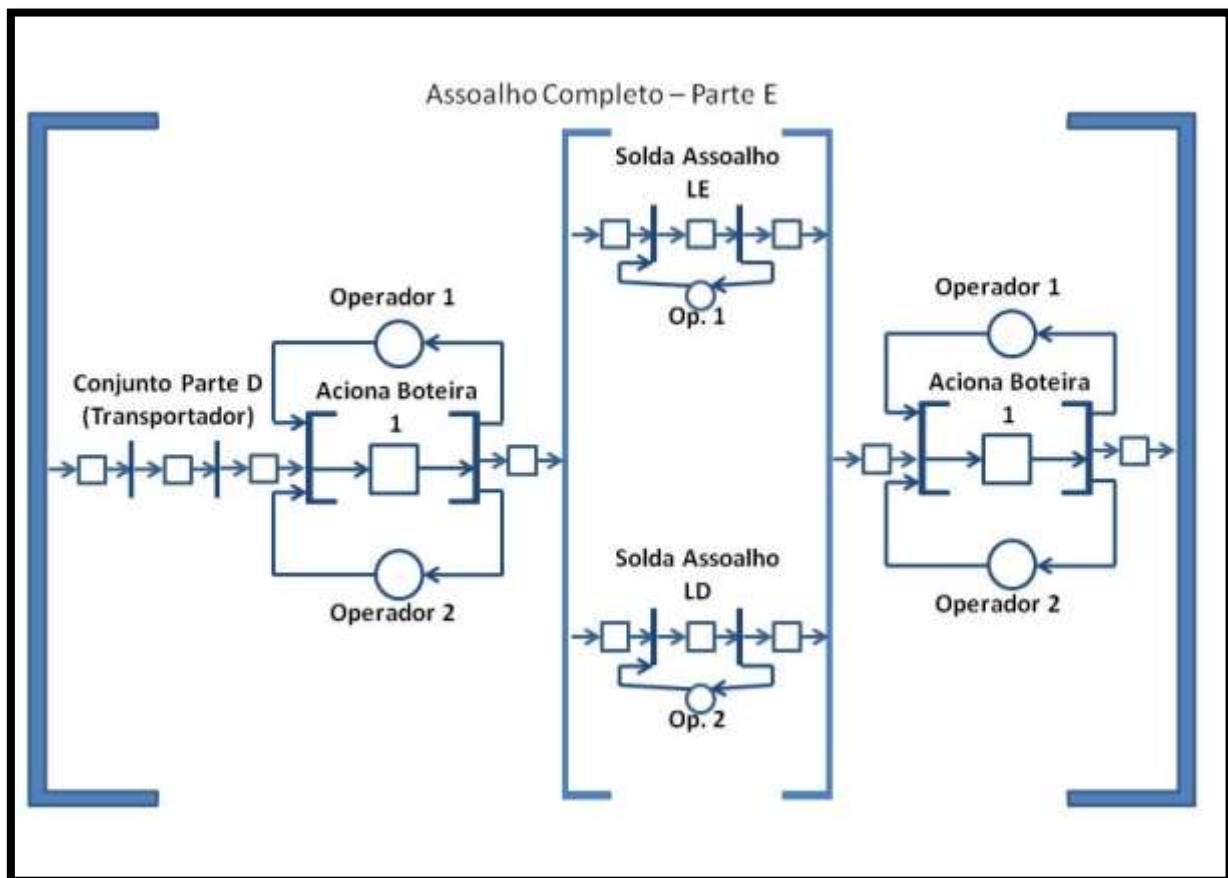


Figura 56 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte E

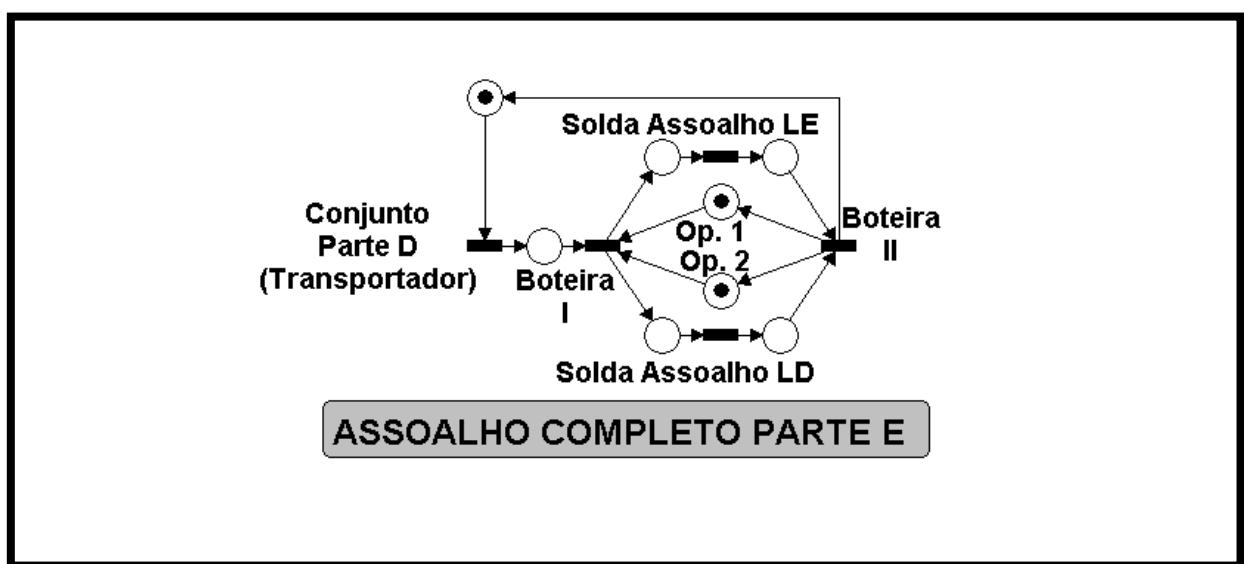


Figura 57 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo - Parte E - Modelo Final



Figura 58 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Assoalho Completo - Parte F

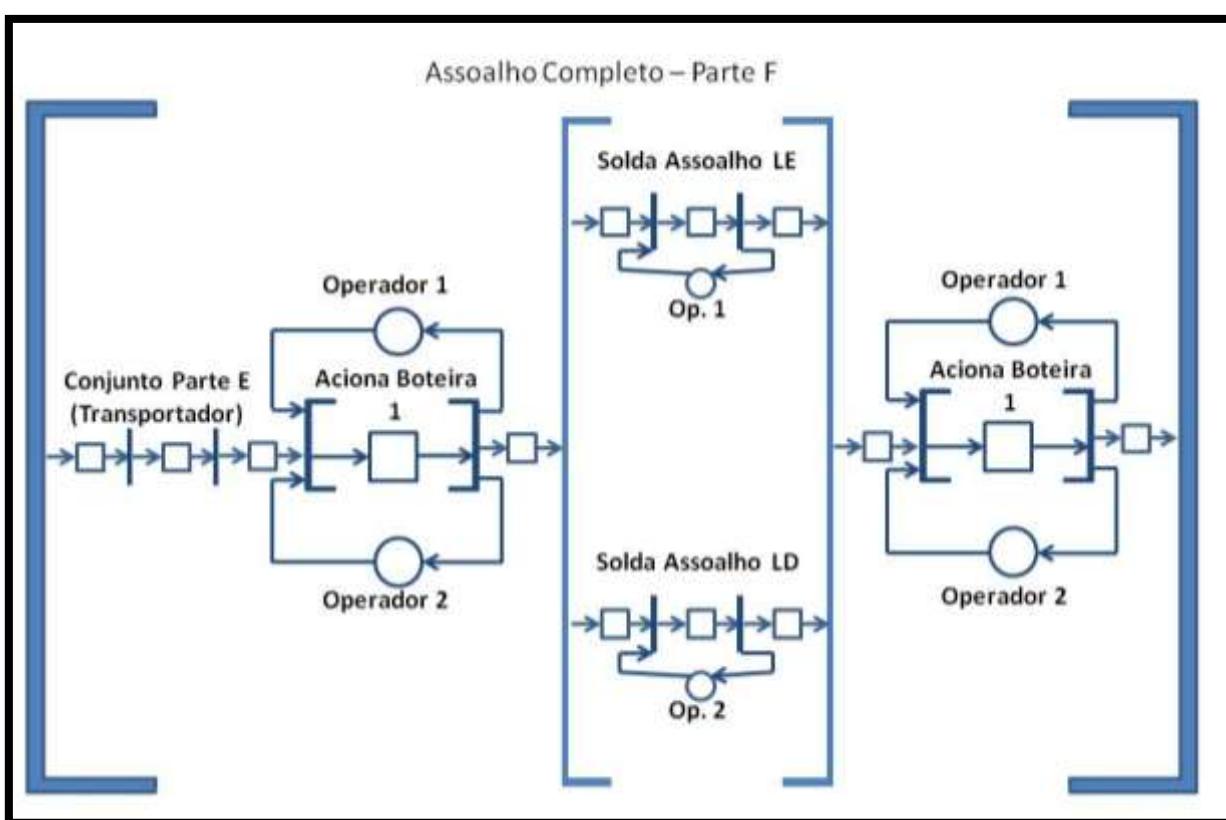


Figura 59 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Assoalho Completo - Parte F

Na célula produtiva Estrutura, vemos que a discriminação em processos individuais neste caso, não considerou a complexidade e quantidade de operações. Procurou-se priorizar a segregação em processos que agregam diferentes valores ao produto: como nosso exemplo é de um veículo automotivo, utilizamos basicamente sua composição em partes estruturais do veículo. O fator importante para o processo estar balanceado é o tempo de cada atividade, independente de sua complexidade e variedade de operações (Figura 70 à Figura 72).

Finalizando o processo, temos a representação da célula produtiva Teto da Figura 73 à Figura 82.

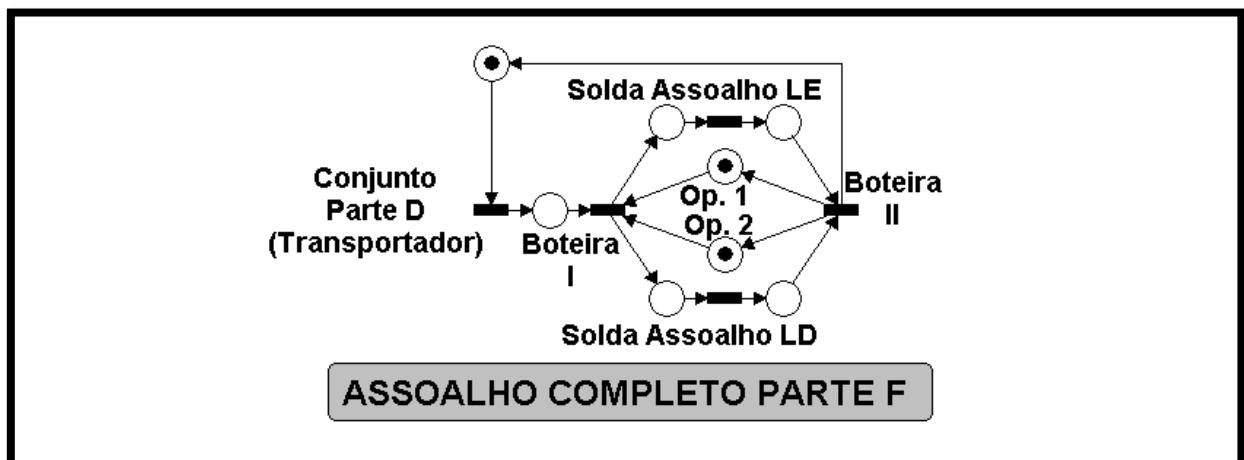


Figura 60 - Exemplo de Aplicação - Assoalho Completo - Parte F - Modelo Final

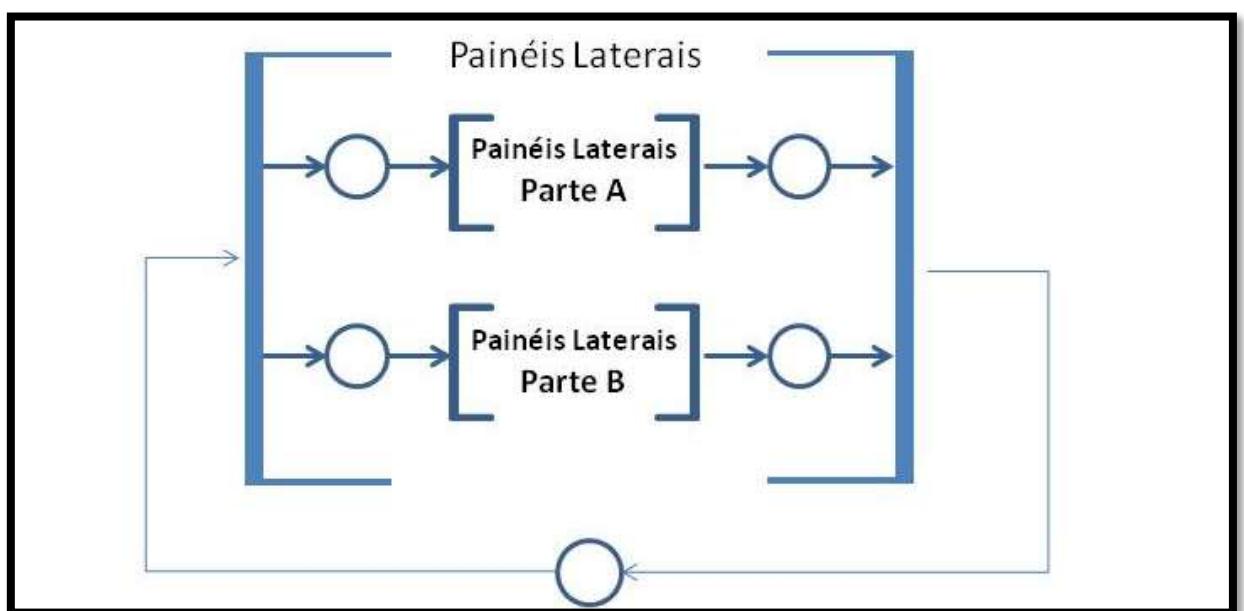


Figura 61 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Painéis Laterais

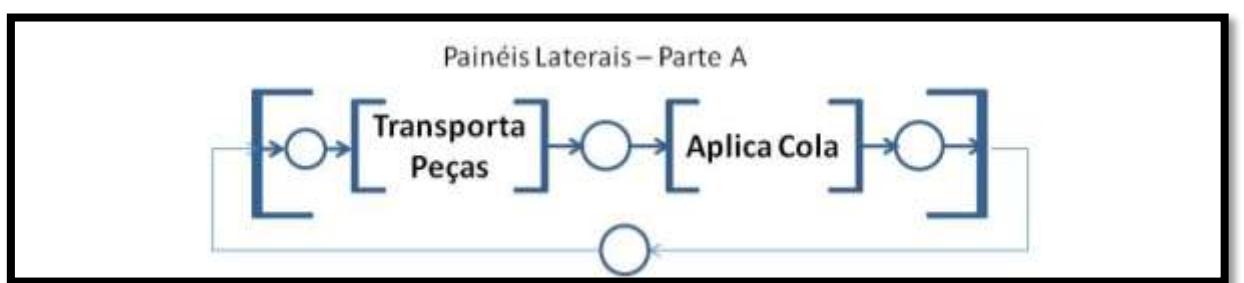


Figura 62 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Painéis Laterais - Parte A

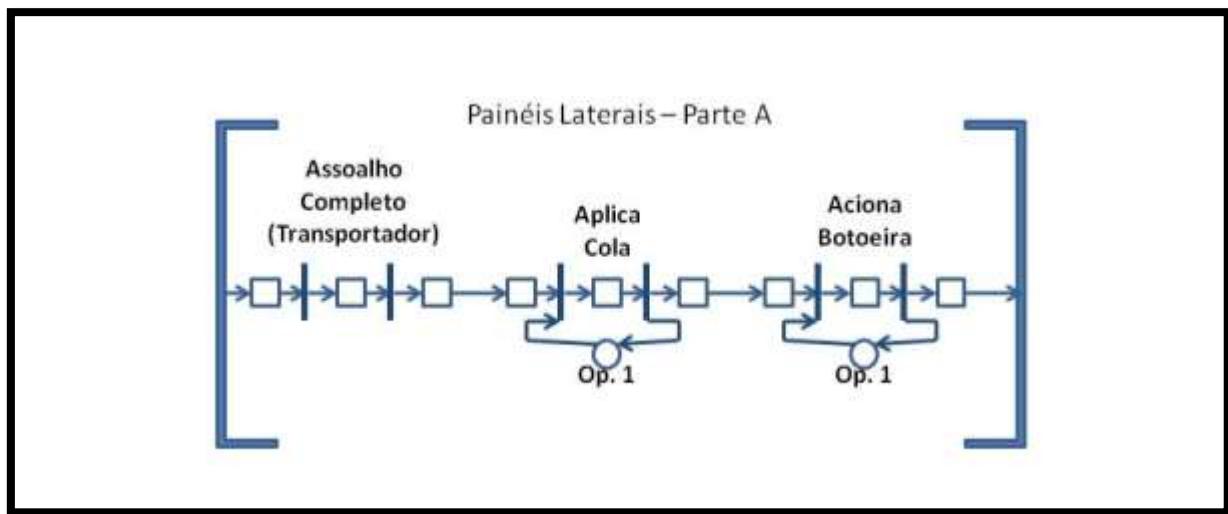


Figura 63 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Painéis Laterais - Parte A

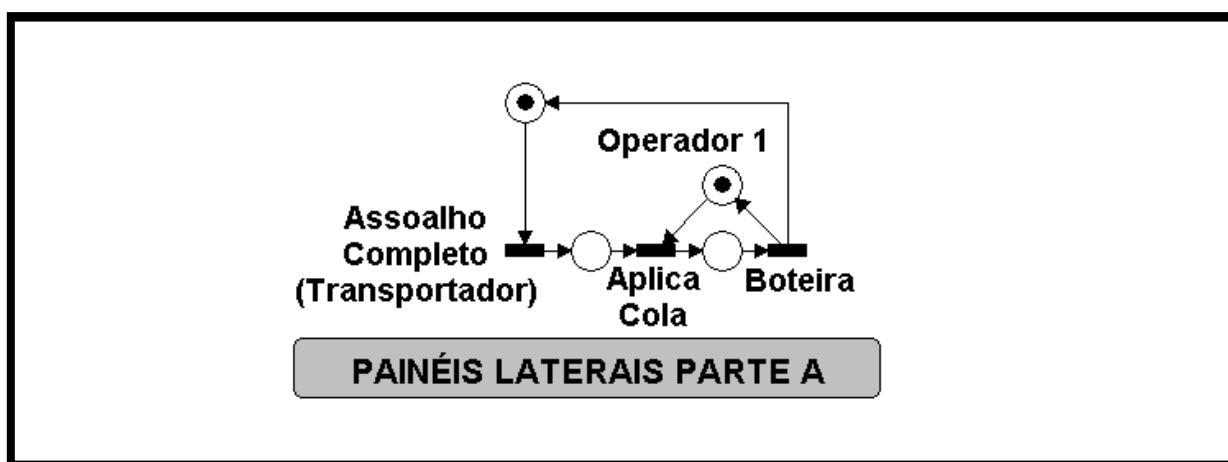


Figura 64 - Exemplo de Aplicação - Painéis Laterais - Parte A - Modelo Final

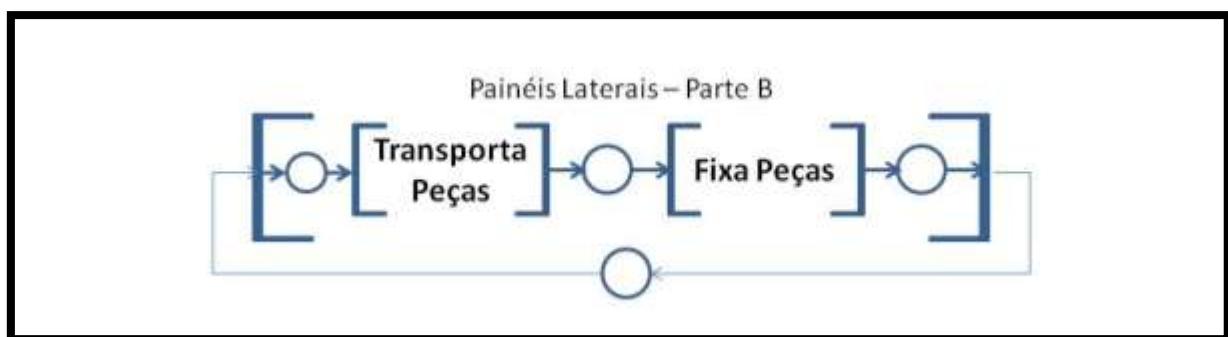


Figura 65 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Painéis Laterais - Parte B

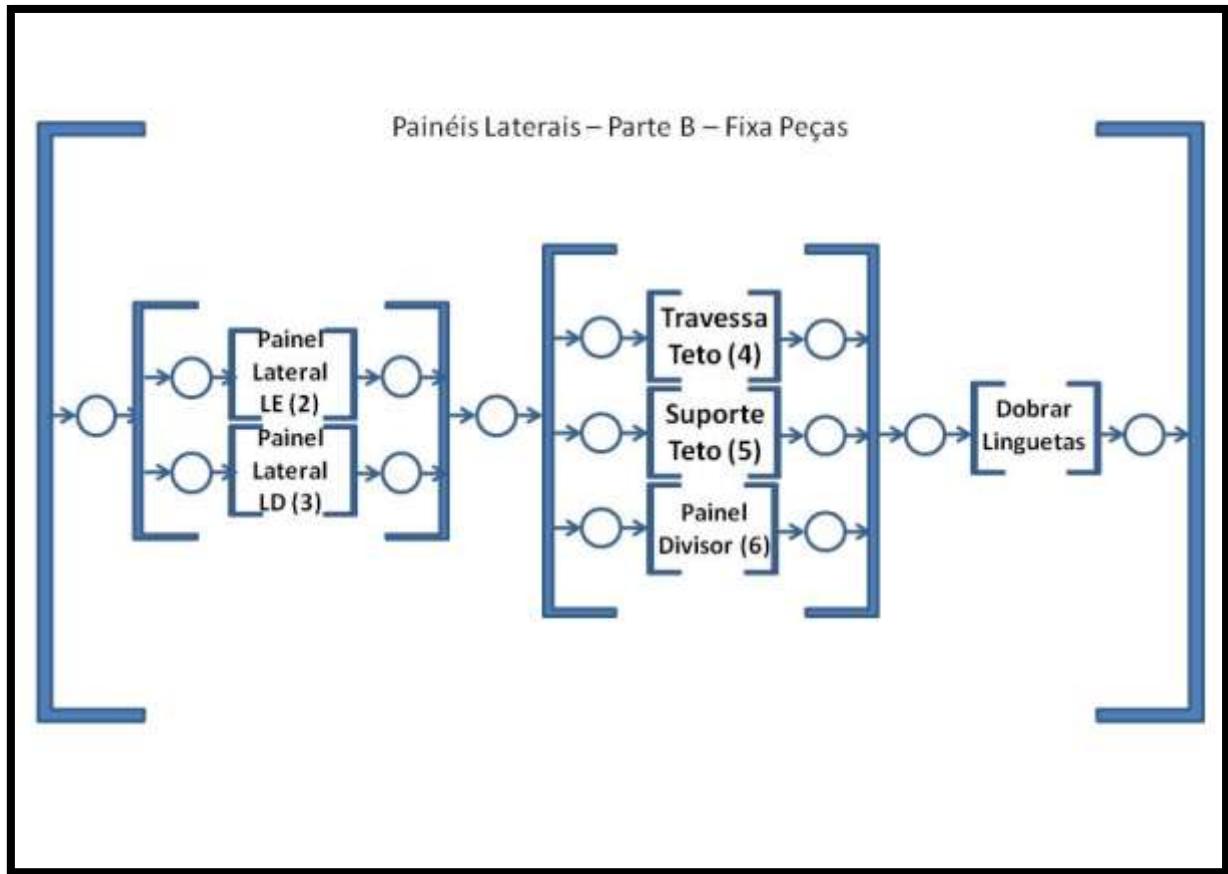


Figura 66 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Painéis Laterais - Parte B - Fixa Peças

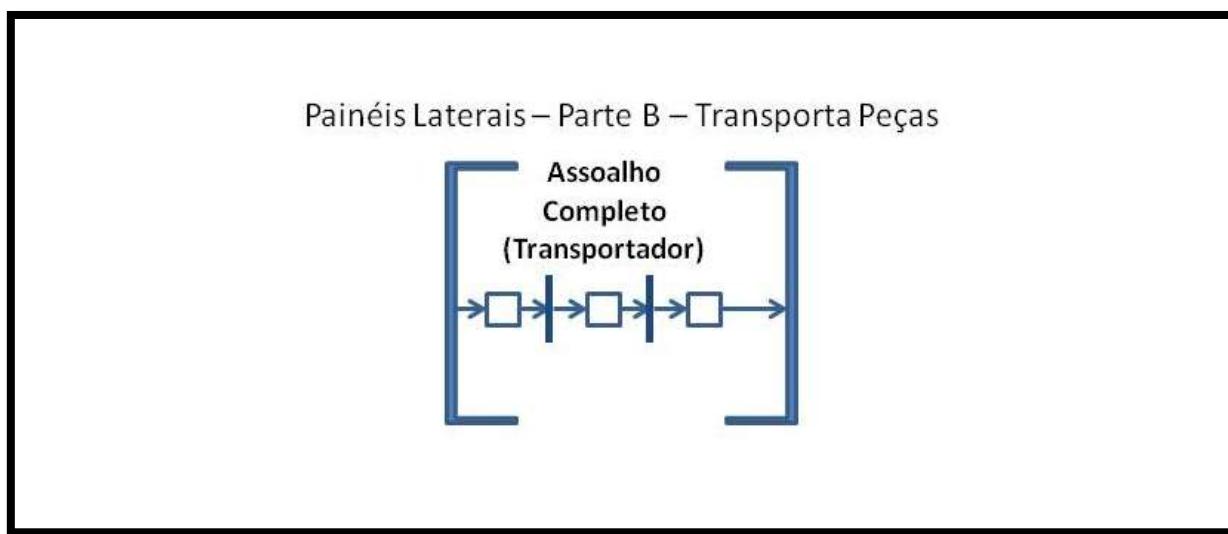


Figura 67 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Painéis Laterais - Parte B - Transporta Peças

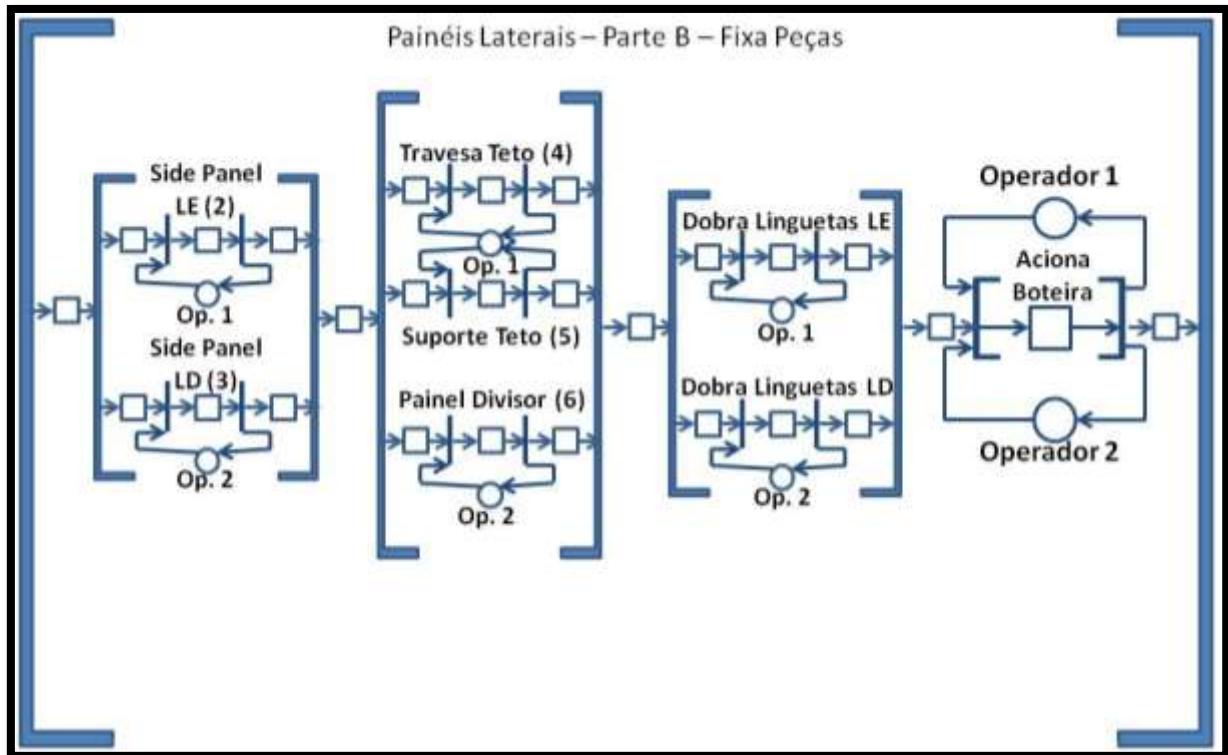


Figura 68 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Painéis Laterais - Parte B - Fixa Peças

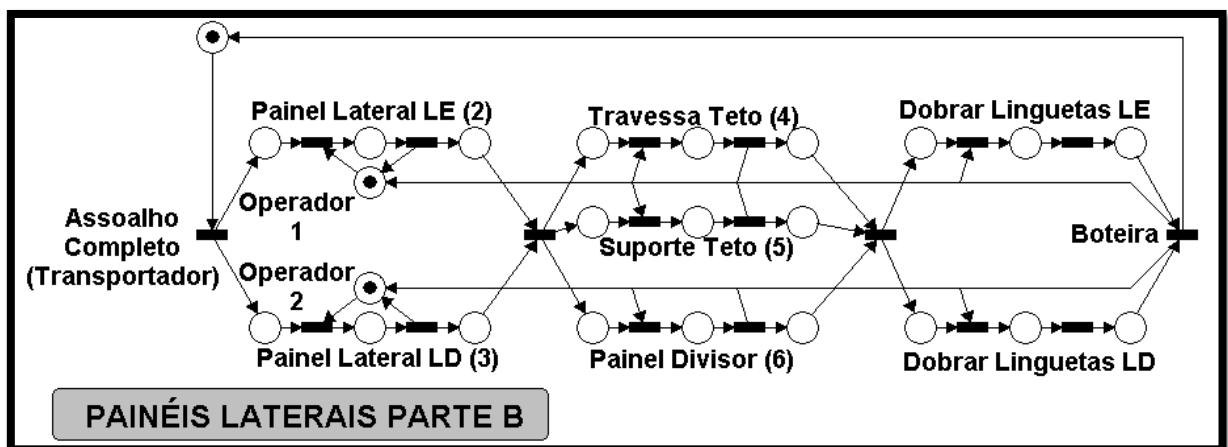


Figura 69 - Exemplo de Aplicação - Painéis Laterais - Parte B - Modelo Final

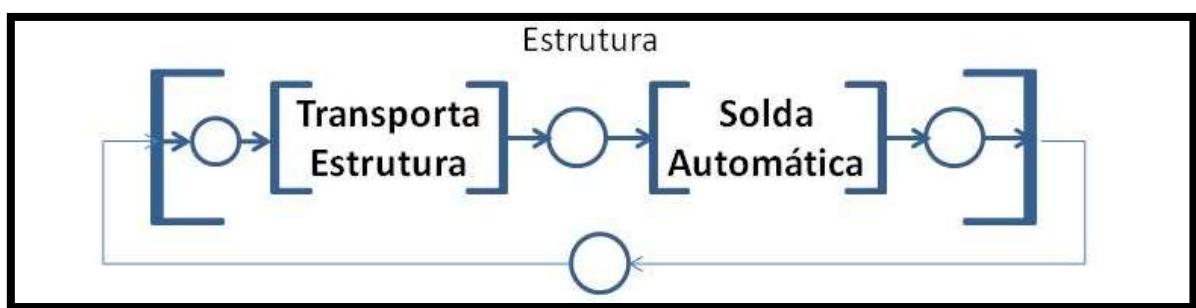


Figura 70 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS – Estrutura

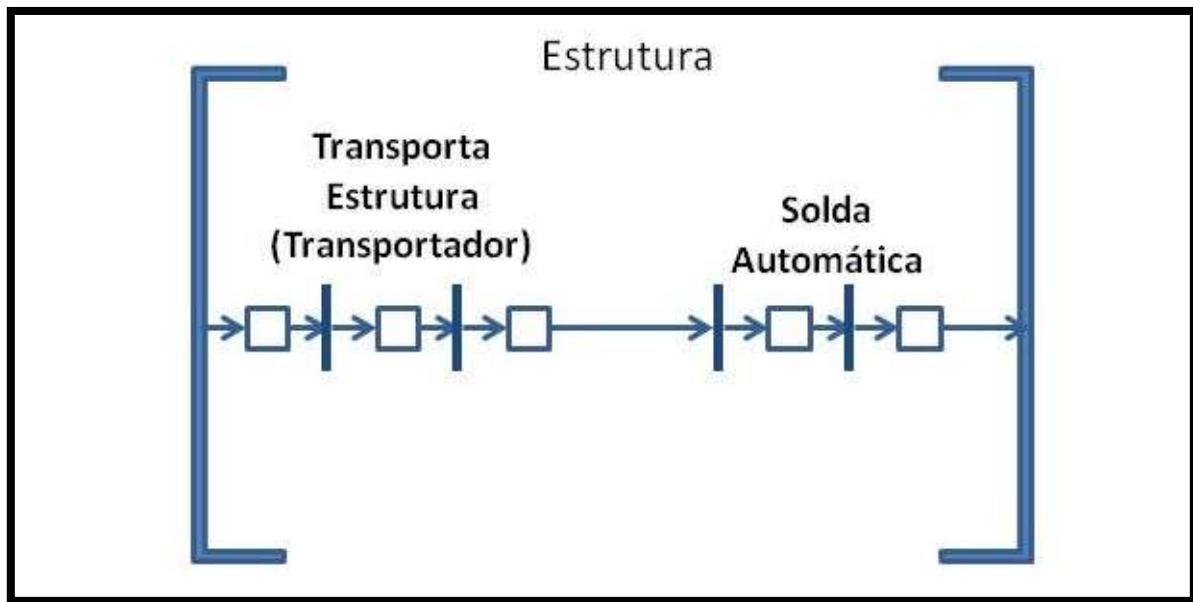


Figura 71 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG – Estrutura

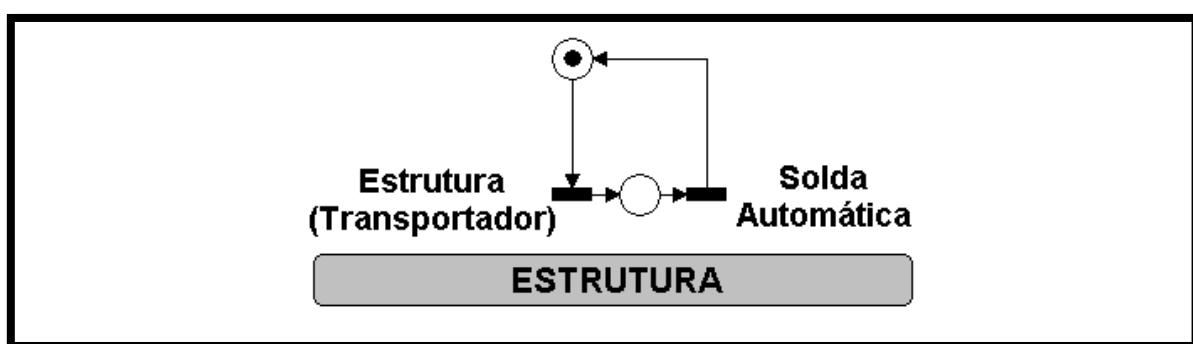


Figura 72 - Exemplo de Aplicação - Estrutura - Modelo Final

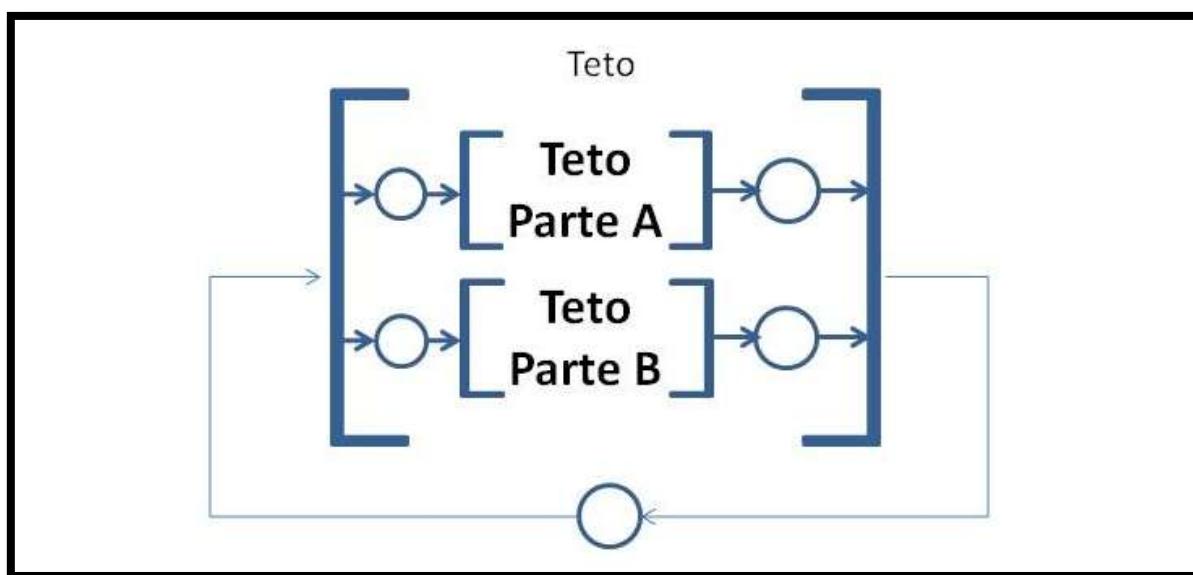


Figura 73 - Exemplo de Aplicação – Grafo PFS – Teto

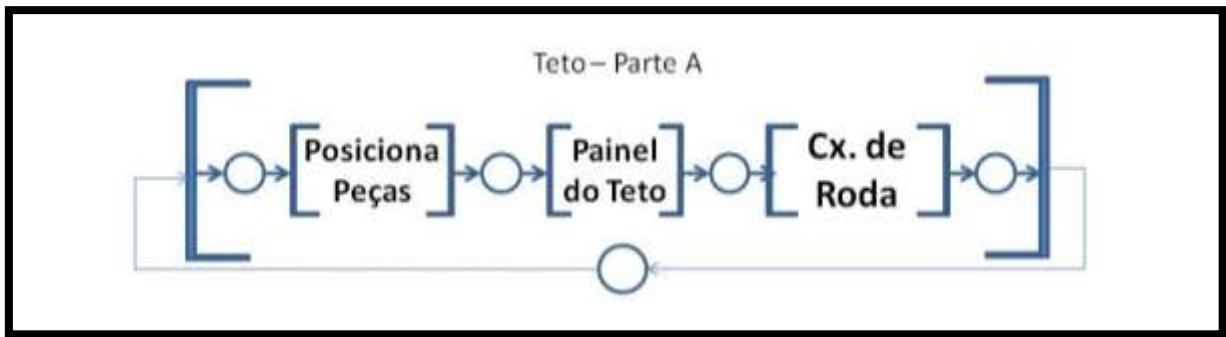


Figura 74 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Teto - Parte A

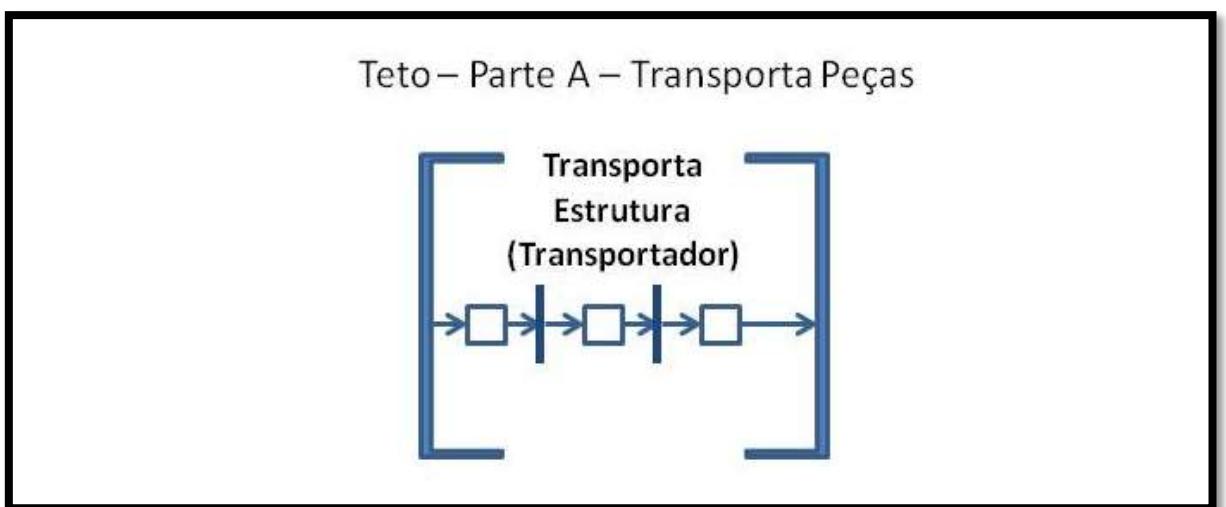


Figura 75 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Teto - Parte A - Transporta Peças

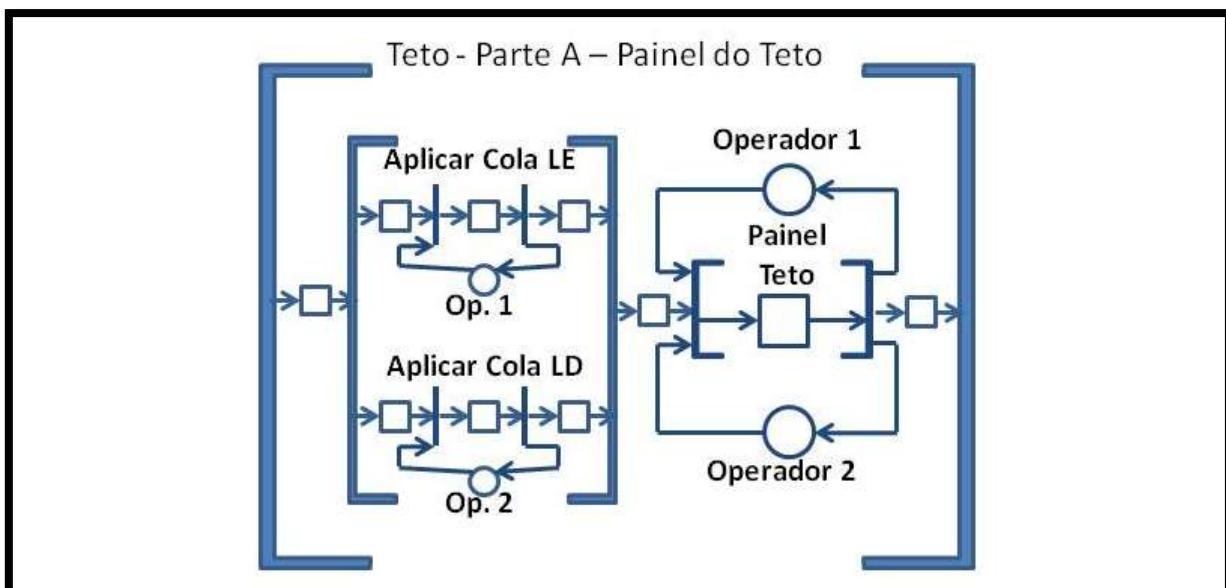


Figura 76 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Teto - Parte A - Painel do Teto

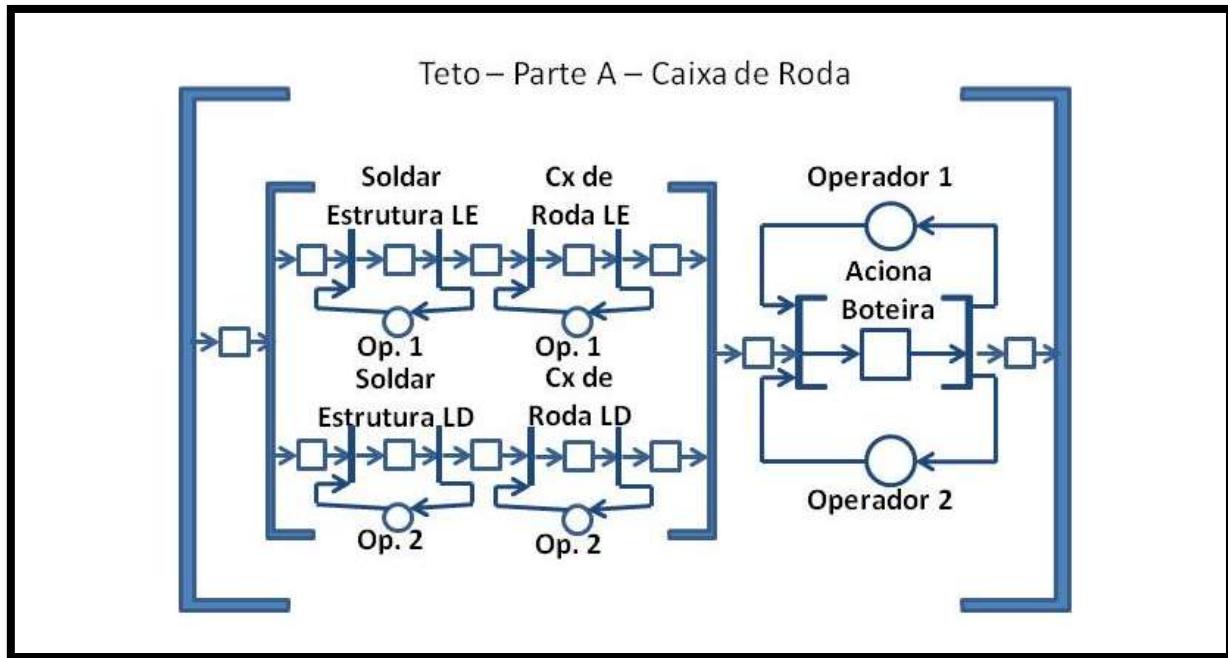


Figura 77 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Teto - Parte A - Caixa de Roda

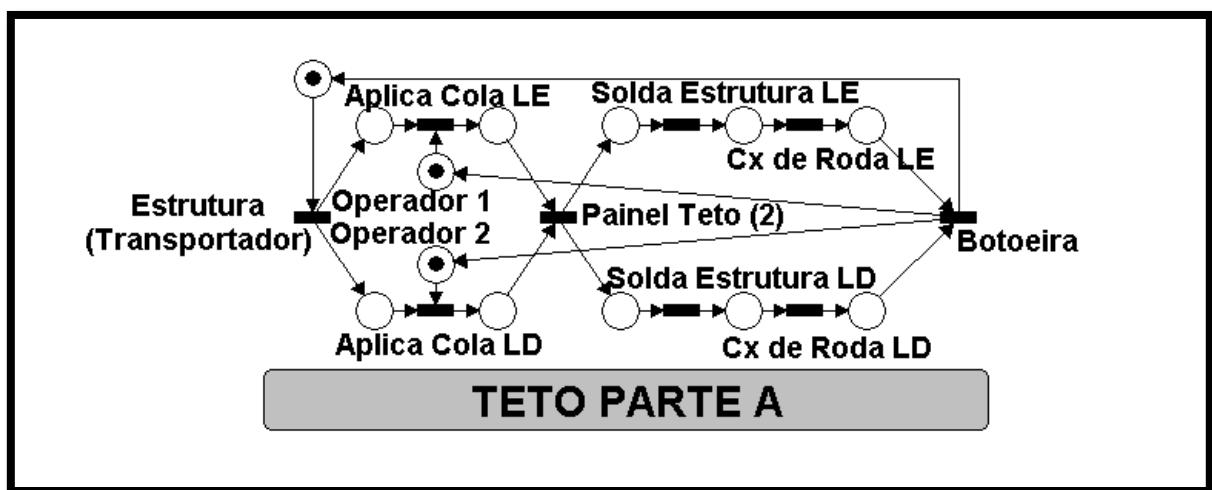


Figura 78 - Exemplo de Aplicação - Teto - Parte A - Modelo Final

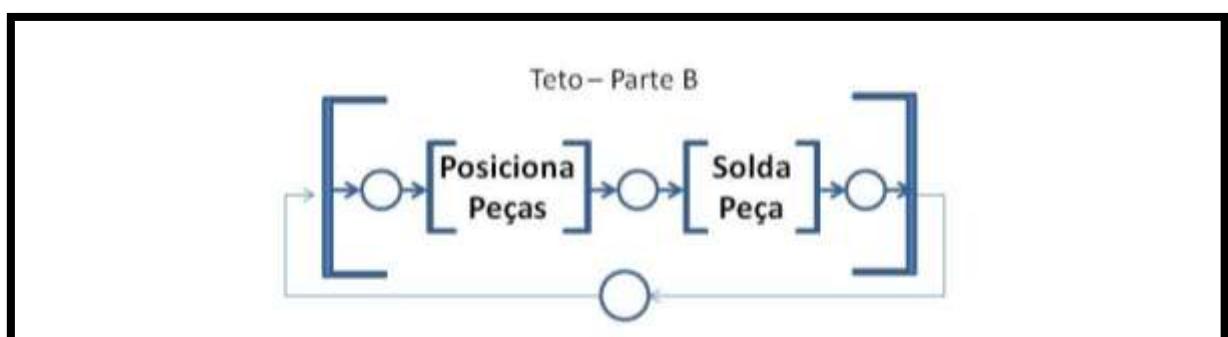


Figura 79 - Exemplo de Aplicação - Grafo PFS - Teto - Parte B

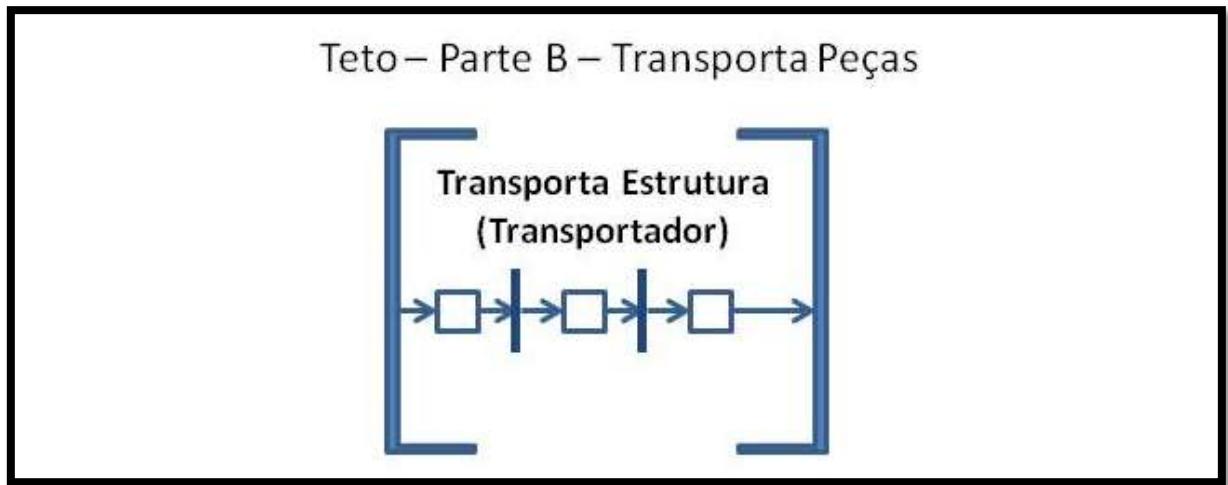


Figura 80 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Teto - Parte B - Transporta Peças

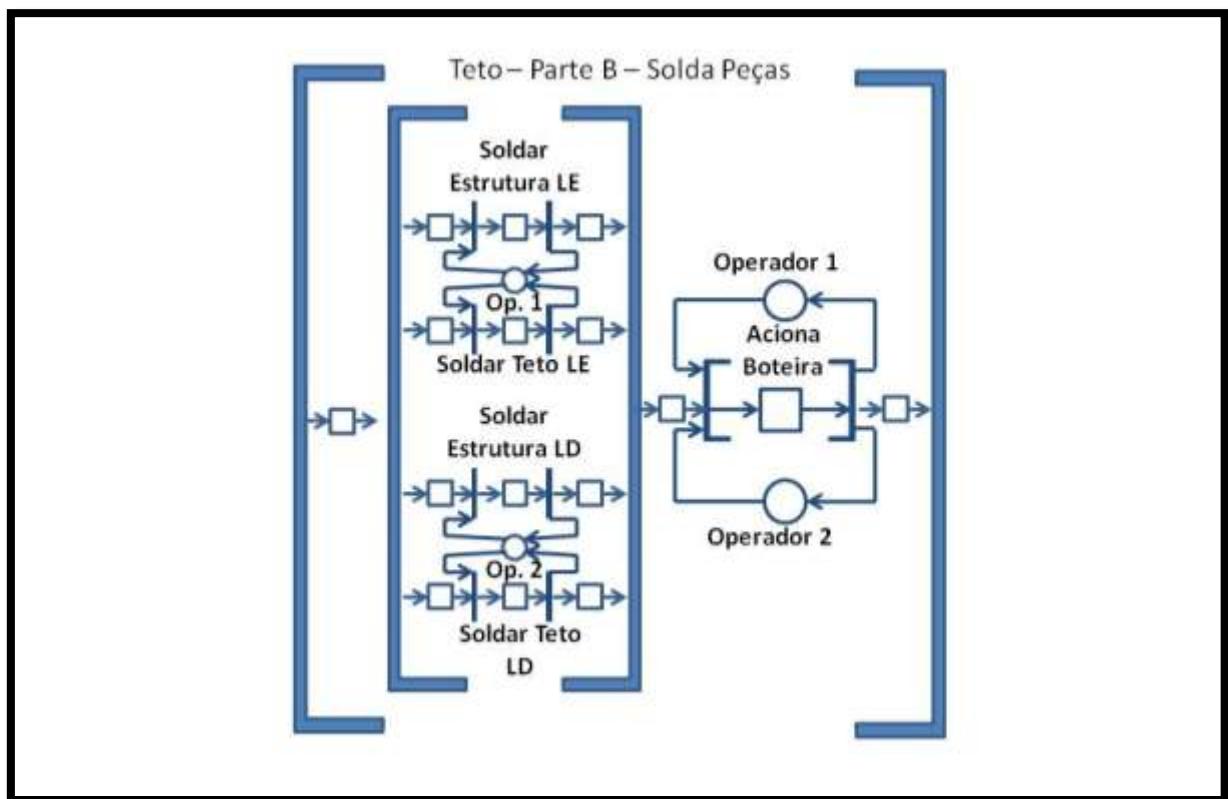


Figura 81 - Exemplo de Aplicação - Grafo MFG - Teto - Parte B - Solda Peças

Para obtermos o modelo completo de toda a linha estudada, que é demasiadamente extenso para ser mostrado em uma única figura, deve-se sistematicamente reunir o modelo final de cada célula, respeitando suas relações de acordo com a Figura 83.

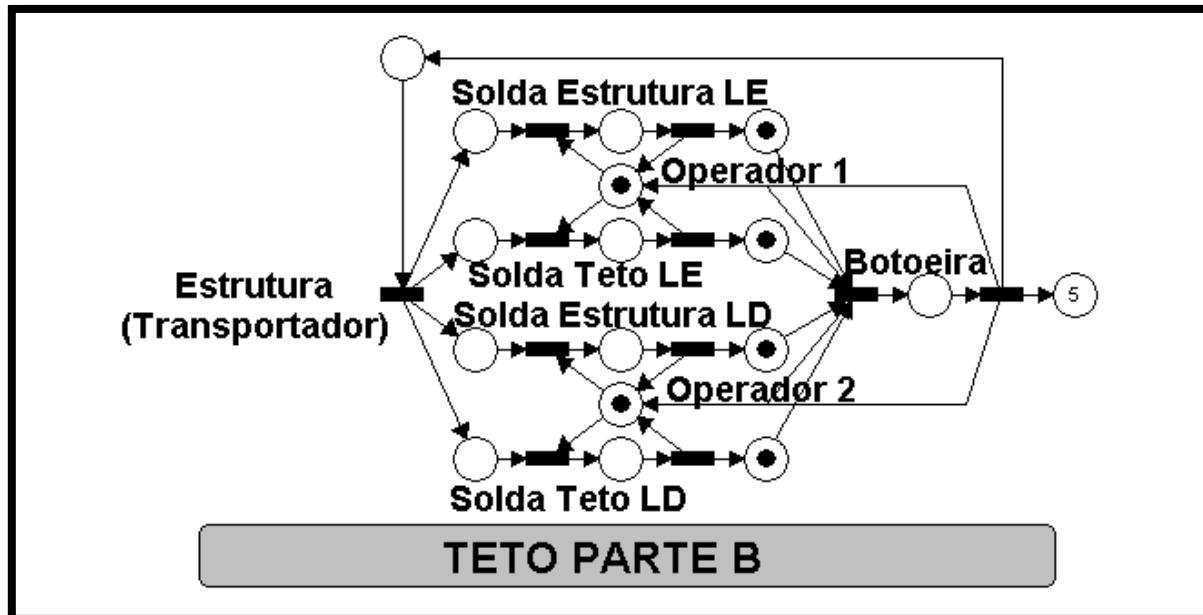


Figura 82 - Exemplo de Aplicação - Teto - Parte B - Modelo Final

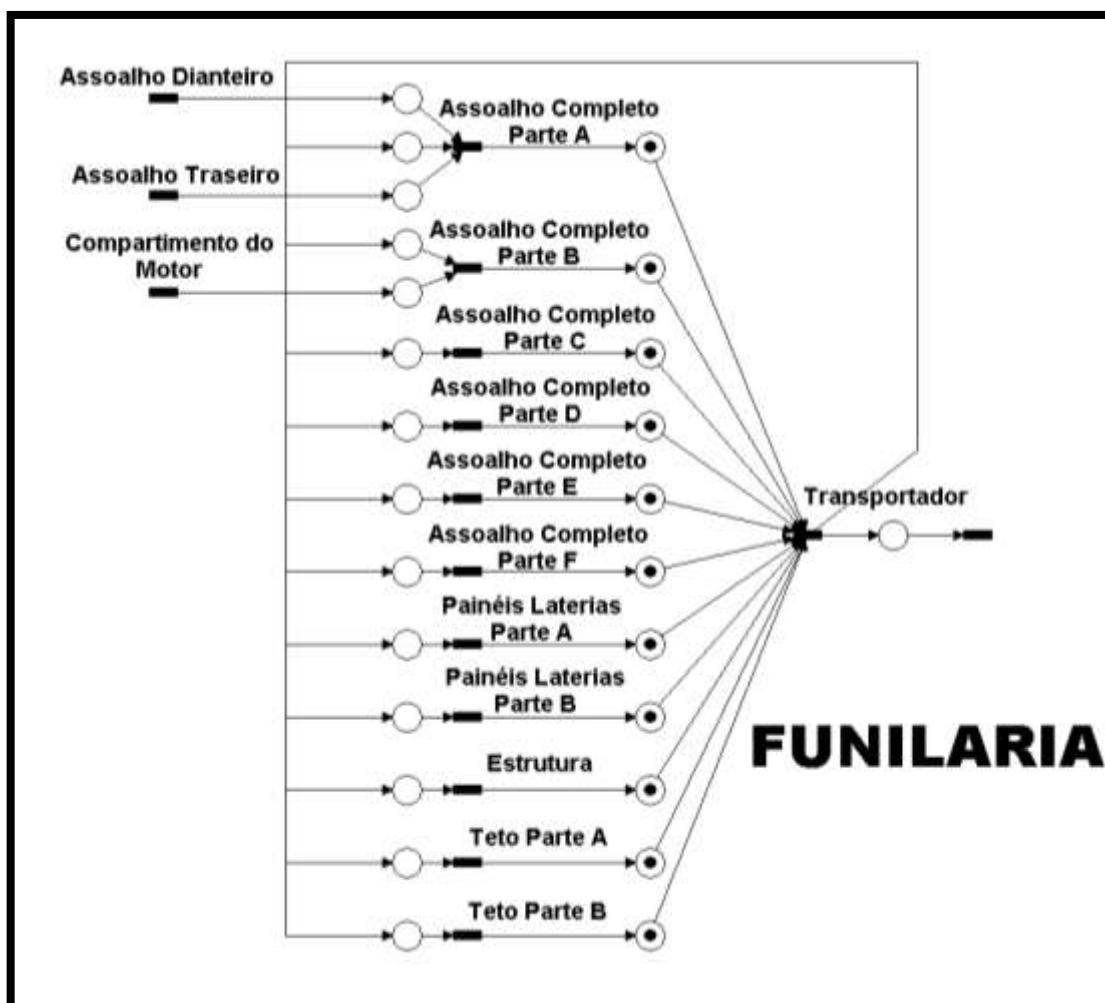


Figura 83 - Exemplo de Aplicação - Modelo Final

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O método proposto contemplou a possibilidade de eliminação das restrições fictícias que podem existir nos procedimentos de controle associados aos processos de fabricação. Desta forma, as restrições que permanecem, são intrínsecas ao processo de fabricação e que devem ser modeladas durante a especificação da lógica de controle dos processos. Por exemplo, conforme visto na atividade *Dobrar Linguetas* na Figura 65, é evidente que para se fixar uma peça a outra, ambas devem estar posicionadas, isto faz parte do processo original da manufatura do produto, neste caso o veículo.

Com o modelo adquirido na aplicação da metodologia desenvolvida ao longo deste trabalho, é possível representar as flexibilidades funcional e operacional dos operadores humanos, analisar diferentes rotas de produção e contribuir para otimizar os resultados obtidos com as dinâmicas de Kaizen que podem ser aplicadas em chão de fábrica.

Pode-se perceber que as metodologias utilizadas atualmente no projeto de uma linha de produção não contemplam alguns conceitos abordados neste trabalho:

- Modelagem discreta para avaliação formal de sugestões de Kaizen.
- Modelagem discreta para representação de estratégias de produção planejadas como meta a serem cumpridas em chão de fábrica.
- Estruturação de técnicas de modelagem para representação de lógicas de controle e de alocação de recursos com arbitração para compartilhamento.

Assim, podemos considerar que determinadas melhorias na linha de produção, podem surgir caso os conceitos apresentados sejam empregados desde a concepção do veículo no contexto de engenharia de produto, onde há o controle dos processos de fabricação das partes que irão compor o automóvel.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAUER, W.; REISIG, W.; ROZENBERG, G. **Petri Nets**: Central Models and Their Properties. Berlim: Springer-Verlag, 1987. 25-115 p. ISBN 3540179054.

BRUNET, A. P.; NEW, S. **Kaizen in Japan**: an empirical study. Oxford: International Journal of Operations & Production Management., v. 23, 2003. 1426-1446 p.

CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to Discrete Event Systems**. 2nd Edition. New York: Springer-Verlag, 2008. 776 p. ISBN 978-0-387-33332-8.

GROOVER, M. P. **Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing**. 3rd Edition. New Jersey: Prentice-Hall, 2008. 815 p.

IMAI, M. **Kaizen - A Estratégia para o Sucesso Competitivo**. 4^a. Edição. São Paulo: IMAM, 1992.

KAGOHARA, M. Y. **Aplicação da metodologia PFS/MFG a sistemas de produção enxuta (Lean Manufacturing Systems)**. 1998. 149 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

KOVACS, I.; MONIZ, A. B. Issues on the anthropocentric production systems. In: MATOS, L. C.; AFSARMANESH, H. **Balanced Automation System**: architecture and design methods. 1st Edition. New York: Chapman & Hall, 1995. 131-140 p.

KUSIAK, A. **Flexible Manufacturing Systems**: Methods and Studies. New York: Elsevier Science Pub. Co., 1986. 377 - 408 p. ISBN 0444879218.

LIKER, J. K. **O modelo Toyota**: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo. Porto Alegre: Bookman, 2005. ISBN 85-363-0495-2.

MACIEL, P. R. M.; LINS, R. D.; CUNHA, P. R. F. **Introdução às Redes de Petri e Aplicações**: 10^a Escola de Computação. Campinas: Unicamp, 1996. 187 p.

MIYAGI, P. E. **Controle Programável**: Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos. 1^a Edição. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2007. 194 p.

MORALES, R. A. G. **Modelagem e Análise de Sistemas Flexíveis de Manufatura Tolerantes à Falhas Baseado em Rede Bayesiana e Rede de Petri**. 2009. 121 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

NAKAMOTO, F. Y. **Sistematização do Projeto do Controle de Sistemas Produtivos**. 2002. 147 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

NAKAMOTO, F. Y. Et Al. **A Hybrid Method to Generate Control Algorithms for Complex System**. Trabalho apresentado a ICNPAA 2010 World Congress: 8th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences. 2010, São José dos Campos. No prelo.

NAKAMOTO, F. Y.; MIYAGI, P. E.; SANTOS FILHO, D. J. Automatic generation of control solution for resource allocation using petri net model. **Produção**, v. 19, n. 1, p. 008-026. 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/prod/v19n1/02.pdf>. Acesso em: 19 set. 2010.

ORIBE, C. Os 70 Anos do Ciclo PDCA. **Revista Banas Qualidade**, ano XVII, n. 209, p. 20-25, Out. 2009.

PANIAGO, A. L. **Kaizen - Implementação na indústria de autopeças**: resultados na redução das perdas na área produtiva. 2008. 130 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

REISIG, W.; ROZENBERG, G. **Lectures on Petri Nets I: Basic Models**. Berlim: Springer-Verlag, 1998. 12-121 p. ISBN 3540653066.

SANTOS FILHO, D. J. **Aspectos do Projeto de Sistemas Produtivos**. 2000. 116 p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. **A Máquina que Mudou o Mundo**. Tradução de Ivo Kortowski ; Revisão técnica de José Roberto Ferro. 11^a Edição. Rio de Janeiro: Campus, 2004. 332 p. ISBN 8535212698