

Sistemática de Balanceamento Dinâmico nos Sistemas de Manufatura Avançada

Eduardo Bertti Percy Javier Igei Kaneshiro Osvaldo Luis Asato Francisco Yastami Nakamoto

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, Brasil
(e-mail: eduardo.bertti@aluno.ifsp.edu.br, percyigei@ifsp.edu.br, asato@ifsp.edu.br, nakamoto@ifsp.edu.br)

Abstract: In production systems, the assembly line is widely used to manufacture products that have a set of repetitive activities and well-defined sequences. The efficiency of the assembly lines impacts the entire manufacturing process, and the optimization of resources is essential in this context. Balancing the distribution of activities to be performed by the workstations is still a design challenge, especially in the operation of mixed-product assembly lines. The difficulty occurs due to the large variation between the times of the activities of the various types of products, and short-term changes in the sequencing of these products. This paper proposes a balancing system that considers the effects of product sequencing on resource utilization, and that is based on the determination of specific sets of sequenced activities for each type of product and operator, implementing greater flexibility in workstations. This system uses balancing strategies through the application of precedence diagram and heuristic algorithm of positional weights. The modeling and simulation performed using the Colored Petri Net. To illustrate the main characteristics of this approach, a case study is presented which has as research object a truck assembly line in operation in Brazil. The simulation results indicate that it is possible: reduce the dependency on product sequencing; meet cycle time requirements; reduce by 12.5% the resources with acceptable average occupancy; and define a system for use by assembly line managers.

Resumo: Nos sistemas produtivos, a linha de montagem é muito utilizada para a fabricação de produtos que possuem um conjunto de atividades repetitivas e sequências bem definidas. A eficiência das linhas de montagem impacta em todo o processo de fabricação, e a otimização dos recursos é essencial neste contexto. Elaborar o balanceamento na distribuição das atividades a serem realizadas pelas estações de trabalho ainda é um desafio no projeto, principalmente na operação das linhas de montagem de produtos mistos. A dificuldade ocorre devido à grande variação entre os tempos das atividades dos diversos tipos de produtos, e às alterações de curto prazo no sequenciamento destes produtos. Este trabalho propõe uma sistemática de balanceamento que considere os efeitos do sequenciamento de produtos na utilização dos recursos, e que se baseie na determinação de conjuntos específicos de atividades sequenciadas para cada tipo de produto e operador, implementando uma maior flexibilização nas estações de trabalho. Essa sistemática utiliza estratégias de balanceamento através da aplicação de diagrama de precedência e algoritmo heurístico dos pesos posicionais. A modelagem e simulação é realizada utilizando a Rede de Petri Colorida. Para ilustrar as principais características desta abordagem, é apresentado um estudo de caso que tem como objeto de pesquisa uma linha de montagem de caminhões em operação no Brasil. Os resultados da simulação indicam ser possível: reduzir a dependência do sequenciamento de produtos, atender ao tempo de ciclo, reduzir em 12,5% os recursos com ocupação média aceitável e definir uma sistemática para uso dos gestores das linhas de montagem.

Keywords: Dynamic balancing; Assembly line balancing; Mixed-model lines; Colored Petri Nets.

Palavras-chaves: Balanceamento dinâmico; Balanceamento de linha de montagem; Linhas de modelos mistos; Redes de Petri Colorida.

1. INTRODUÇÃO

A globalização elevou a concorrência entre as indústrias a um patamar em que a busca por diferenciais competitivos é uma questão de sobrevivência. A melhoria contínua da performance de seus produtos, em qualidade e preço, tem levado as indústrias a reavaliarem atitudes e processos (Costa et al. 2019). A necessidade de resultados a curto prazo, a customização em massa e os avanços tecnológicos produziram inúmeras pesquisas que formaram a base para a quarta Revolução Industrial. A Indústria 4.0 contempla

sistemas de automação industrial integrada e inteligente, combinando conceitos de engenharia até as mais avançadas tecnologias da informação (Poli, 2018). Uma das características principais da Indústria 4.0 é criar possibilidades nos processos de fabricação devido ao aumento da interoperabilidade entre redes de produção. Um exemplo, é o sistema supervisor centralizado que acessa todos os sistemas de automação da planta, podendo disponibilizar um histórico das falhas que paralisaram o processo produtivo, o que possibilita análises e rápidas tomadas de decisão. Desta maneira, as melhorias podem ser

planejadas para que a eficiência e a disponibilidade de produção sejam ampliadas (Stevan et al. 2018).

A linha de montagem é o método mais utilizado para a manufatura de produtos complexos e, por estarem no final do processo, impactam fortemente no sistema de fabricação das indústrias. A linha de montagem pode ser definida como uma sequência de estações de trabalho que executam um conjunto de atividades repetitivas que requerem um tempo de realização e possuem uma relação de precedência entre si (Kucukkoc; Zhang, 2016).

Ao considerar a importância do balanceamento de atividades na eficiência produtiva, e o fato da grande maioria das indústrias atribuir aos gestores a responsabilidade da distribuição das atividades aos operadores, o presente estudo tem como objetivo propor uma sistemática de balanceamento dinâmico objetiva, baseada em uma linha de montagem bilateral de produtos mistos. Essa sistemática utiliza estratégias de balanceamento através da aplicação de diagrama de precedência, algoritmo heurístico dos pesos posicionais, e modelagem utilizando a rede de Petri Colorida. A sistemática será baseada na determinação de conjuntos específicos de atividades sequenciadas para cada operador e tipo de caminhão, implementando uma maior flexibilização nas estações de trabalho. A sistemática será validada por simulação utilizando o programa CPN Tools.

Este artigo foi dividido em quatro capítulos. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica. O capítulo 3 detalha a sistemática de balanceamento dinâmico através de um estudo de caso, e compara os resultados antes e após a aplicação da sistemática. E por fim, o capítulo 4 apresenta as conclusões.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As linhas de montagem podem ser de produto único ou de produtos mistos, ser do tipo básica (opera em um dos lados do produto) ou bilateral (opera de ambos os lados do produto), e ser simples (única linha) ou paralelas (duas ou mais). O planejamento da configuração das linhas é importante para as empresas devido ao grande investimento envolvido (Boysen et al. 2008), as premissas do projeto de uma linha estão associadas diretamente às características do produto e à capacidade produtiva pretendida (Groover, 2017).

O tempo de ciclo, baseado na teoria das restrições, é um indicador objetivo para o cumprimento da meta de produção, sendo determinado e limitado pela estação de trabalho com tempo de operação mais longo (Goldratt; Cox, 2006). O tempo de ciclo relaciona-se diretamente ao balanceamento de linha, o balanceamento imperfeito é um dos maiores problemas técnicos no projeto e operação de uma linha de montagem manual, e tem um forte impacto em sua eficiência global (Groover, 2017).

O balanceamento das linhas de montagem tem como principal meta, distribuir as atividades, atendendo às relações de precedências entre elas, conforme o tempo de ciclo (Kucukkoc; Zhang, 2016).

A distribuição das atividades aos operadores, comumente, é

realizada pelos gestores de produção sem seguir uma sistemática, utilizando a experiência profissional, o que pode gerar problemas de eficiência na linha de montagem, principalmente quando ocorrem alterações no volume de produção ou nas restrições. A produtividade de uma linha é determinada pela distribuição das atividades nas estações de trabalho (Cerbaso et al. 2017). Pesquisas empíricas mostraram que, apenas um pequeno percentual de indústrias utiliza algum algoritmo para a distribuição de atividades. Esta baixa utilização talvez seja consequência de pesquisas acadêmicas focadas em poucas extensões práticas. Na vida real, os sistemas de montagem requerem várias extensões consideradas simultaneamente (Boysen et al. 2008; Boysen et al. 2022). Jiao et al. (2021) relatam que 39% das pesquisas recentes abordam linhas básicas, 24% linhas bilaterais e 37% abordam outras configurações.

Petri (1962) propôs, em sua tese de doutorado, o conceito, conhecido hoje como rede de Petri, como sendo um grafo bipartido constituído por *lugares* (representados por círculos ou elipses) e *transições* (representadas por retângulos) ligados por *arcos orientados*. De acordo com Murata (2015), a rede de Petri é uma ferramenta de modelagem gráfica e matemática aplicável a muitos sistemas, que pode ser usada no estudo de processamento de informações caracterizados por serem concorrentes, assíncronos, distribuídos, paralelos, não determinísticos e/ou estocásticos. Para Zhou; Dicesare (1993), a elaboração da modelagem é o primeiro passo para controle, validação, análise da performance e simulação de um sistema de manufatura, utilizando-se as redes de Petri.

A simulação é uma ferramenta poderosa para a análise de novos projetos, ajustes de sistemas existentes e propostas de mudanças das regras operacionais. A condução de uma simulação válida é ao mesmo tempo uma arte e uma ciência (Banks, 2010). Para Sime et al. (2019), técnicas de simulação a eventos discretos podem ser empregadas para projetar, desenvolver, implantar e analisar os problemas de manufatura. Pröpster et al. (2015) afirmam que a simulação é o único método de avaliação do efeito da sequência dos produtos na otimização da mão-de-obra. A simulação é uma tecnologia da Indústria 4.0 para gestão de sistemas complexos (Ferreira et al. 2020).

Conforme Jensen e Kristensen (2009), a rede de Petri colorida é uma linguagem gráfica para a construção de modelos de sistemas simultâneos, análise das propriedades, e de modelação de eventos discretos. Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos e mostram o potencial da rede de Petri colorida para representar e simular o comportamento de sistemas industriais. Em Pereira et al. (2021), foi utilizada a rede de Petri colorida para descrever o comportamento de uma máquina convertidora de fraldas, e em Neves et al. (2021), foi proposta uma sistemática para modelar e simular um sistema de planejamento dinâmico da produção.

2.1 Cálculo do Tempo de Ciclo

Segundo Groover (2017), o cálculo do tempo de ciclo considera a eficiência da linha de montagem. É necessário subtrair o tempo perdido, por motivos diversos, do tempo

total diário. Portanto, T_c é determinado, conforme “(1)”, considerando T_d como o tempo disponível por dia:

$$T_c = (T_d * E) / C_d \quad (1)$$

em que T_c é o tempo de ciclo da linha, T_d é o tempo diário disponível, E é a eficiência da linha e C_d é a meta de produção. Conforme Groover (2017), os valores de E para uma linha de montagem manual variam entre 0,90 a 0,98.

2.2 Método dos Pesos Posicionais em 5 passos

Introduzido por Helgeson e Birnie (1961), o método dos pesos posicionais, do inglês *ranked positional weights* (RPW), é demonstrado em Groover (2011) com os seguintes passos:

Passo 1 – Informar o tempo das atividades;

Passo 2 – Estabelecer as restrições de cada atividade, algumas atividades obrigatoriamente são realizadas antes de outras, são as restrições de precedência;

Passo 3 – Realizar o diagrama de precedências. As atividades simbolizadas por nós, as restrições de precedências

por setas, e o tempo de duração da atividade (em minutos) sobre os nós, conforme Fig. 1;

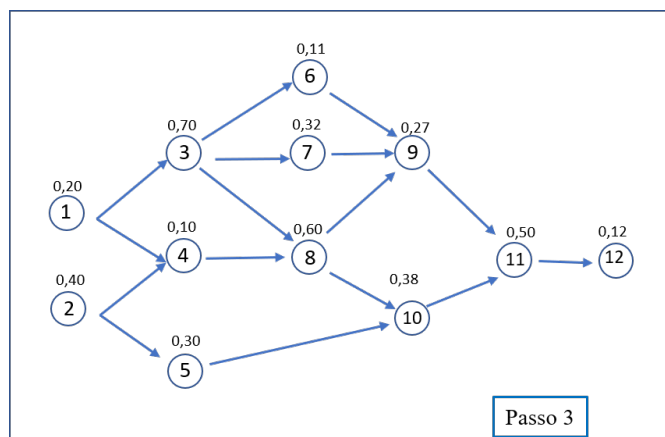


Fig.1 – Exemplo de diagrama de precedências, de acordo com Passo 3 do método dos pesos posicionais
 Fonte: Autor baseado em Groover (2011)

Passo 4 – O cálculo do RPW é realizado para cada atividade. O cálculo considera o valor do tempo e a posição das atividades no diagrama de precedências. O RPW de uma atividade, é a soma do seu tempo e dos demais tempos das atividades realizadas posteriormente, por exemplo:

$$RPW_8 = 0,60 + 0,27 + 0,38 + 0,50 + 0,12 = 1,87$$

$$RPW_{11} = 0,50 + 0,12 = 0,62$$

Passo 5 – As atividades serão realizadas de acordo com a classificação do maior para o menor RPW.

2.3 Rede de Petri Colorida

Jensen e Kristensen (2009) afirmam que a rede de Petri colorida é uma linguagem gráfica para construção de modelos de sistemas simultâneos, combinando as capacidades da rede de Petri clássica com uma programação de alto nível CPN ML. As redes Petri clássicas fornecem os

princípios da linguagem gráfica e a linguagem CPN ML, fornece os princípios para a definição dos tipos de dados, descreve a manipulação de dados, e cria modelos compactos e parametrizáveis. Por sua vez, Kaneshiro (2011) e Igei et al. (2011) afirmam que a rede de Petri colorida é uma rede hierárquica que condensa a descrição do sistema, os modelos podem ser estruturados em módulos para sistemas complexos. A Fig.2 demonstra uma rede de Petri colorida antes e depois do disparo da transição t_1 . Nessa rede, a transição t_0 não está sensibilizada, embora os lugares de entrada da transição t_0 conttenham fichas do mesmo tipo (cor), os arcos que ligam os lugares à transição exigem fichas de outro tipo. A transição t_1 , por outro lado, está sensibilizada porque os lugares de entrada satisfazem as condições exigidas pelos arcos. Portanto, a Figura 10b mostra a Rede de Petri depois do disparo da transição t_1 . As fichas (tipo A e tipo B) exigidos pelas condições dos arcos de entrada são consumidas e uma ficha (tipo C) determinada pelo arco de saída é produzida no lugar de saída.

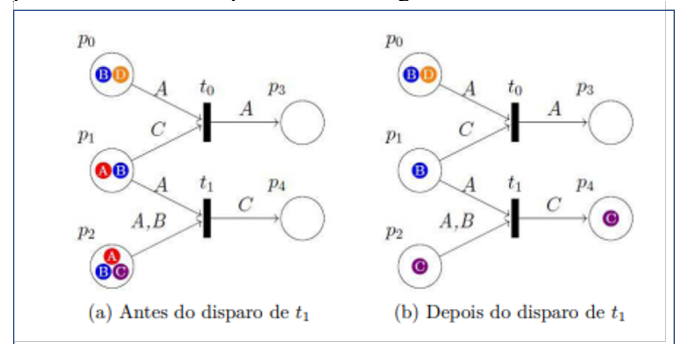


Fig.2 – Representação gráfica de rede de Petri colorida
 Fonte: Noce (2017)

2.4 Simulação e CPN Tools

A Simulação é uma alternativa a experimentação, com custos inferiores, que não interrompe as atividades do sistema real (Law, 2019), e é o único método de avaliação para o efeito da sequência dos produtos na utilização otimizada da mão-de-obra (Pröpster et al. 2015). Técnicas de simulação a eventos discretos são empregadas para projetar e analisar os problemas de manufatura (Sime et al. 2019). Modelar é representar um sistema de forma parcimoniosa, permitindo melhorias com o tempo e as mudanças que ocorrem na simulação (Banks, 2010).

O CPN Tools é um software elaborado para a construção, simulação, análise de espaço de estado e de desempenho de modelos em rede de Petri colorida. Desenvolvido, disponibilizado e atualizado pela “Eindhoven University of Technology”, Holanda (Jensen; Kristensen, 2009).

3. SISTEMÁTICA DE BALANCEAMENTO DINÂMICO – ESTUDO DE CASO

Este estudo de caso tem o propósito de descrever, analisar e validar uma sistemática de balanceamento dinâmico, tendo como objeto de pesquisa uma linha de montagem de caminhões em operação no Brasil. Os dados da simulação não são reais por sigilo empresarial, porém foram estimados por experiência profissional, e são coerentes com a realidade.

3.1 A Linha de Montagem

O setor de veículos comerciais é caracterizado por um mercado que exige uma grande diversificação de produtos, e por ter um volume de produção menor, se comparado à indústria de automóveis, por exemplo. Logo, uma possibilidade considerada é a produção de diversos tipos de produtos na mesma linha de montagem.

O objeto de pesquisa é uma linha de montagem que produz caminhões dos tipos A, B, C, D e E, e que por serem produtos considerados de grande porte, são necessárias atividades nos dois lados da linha. Então, este trabalho se propõe a estudar uma linha de montagem bilateral de produtos mistos. Este estudo focou em 3 estações de trabalho para que houvesse condição de detalhamento. As estações possuem entre 2 e 4 operadores. A quantidade de estações em uma linha depende da complexidade dos produtos, capacidade produtiva e espaço físico. O Mix de produção, considerado neste estudo, foi de 17,5% do caminhão tipo A, 25% do B, 20% do C, 20% do D e 17,5% do E.

3.2 Sistemática de Balanceamento Dinâmico

A sistemática de balanceamento dinâmico utiliza estratégias de balanceamento através da aplicação do algoritmo heurístico dos pesos posicionais, diagrama de precedência e modelo em rede de Petri colorida no programa CPN Tools.

O objetivo da sistemática de balanceamento dinâmico é realizar uma distribuição de atividades, otimizando os recursos humanos (mão de obra), determinando um conjunto de atividades sequenciadas de cada tipo de produto para cada operador, com a premissa que as atividades serão realizadas em estações diferentes, dependendo do tipo de produto, e que as limitações por equipamentos não serão consideradas.

Atualmente, é determinado um conjunto fixo de atividades para cada operador. Basicamente, são realizadas as mesmas atividades para todos os tipos de produtos, o que, às vezes, ocasiona tempo ocioso em alguns tipos e sobrecarga em outros. A sistemática será validada por simulação, utilizando o software CPN Tools. A seguir, a sistemática será demonstrada passo a passo. Inicialmente, foram descritas as premissas do estudo, que são os tipos de produtos, as atividades por tipo, a estação de trabalho, a posição da atividade na linha (lado esquerdo E, direito D, central C ou fora da linha F), conforme demonstra a Fig.3.

Em seguida, foi aplicado o método dos pesos posicionais:

Passo 1: Cronometragem dos tempos das atividades, conforme demonstrado na Fig.3;

Passo 2: Definição das precedências das atividades, como mostra a Fig.3. Se a precedência for “0” não existe restrição, e se for “P” trata-se de uma pré-montagem.

Passo 3: Desenvolvimento do diagrama de precedências a partir dos dados da Fig.3. Sobrepondo os tipos de veículos A, B, C, D e E, tem-se o diagrama ilustrado na Fig. 4, onde demonstra-se as atividades de classes 1, 2 e 3. As de classe 1 (círculo azul) são realizadas na linha e seguem as regras de

precedência; as de classe 2 (círculo verde), são realizadas na linha, mas, não seguem as regras de precedência; e as de classe 3 (círculo laranja) são realizadas fora da linha, e não seguem regras de precedência.

Atividade	APLICAÇÃO					Estação de Trabalho	Posição na Linha	Tempo (min)	Precedido por
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E				
1			x	x		1	F	2,20	P
2			x	x		1	D	1,60	1
3			x	x		1	E	1,60	1
4			x	x		1	D	3,60	2
5			x	x		1	E	3,60	3
6	x	x	x			1	D	1,60	0
7	x	x	x			1	D	2,20	6
8	x	x	x	x	x	2	D	0,80	0
9	x	x	x	x	x	2	E	0,80	0
10			x			2	D	0,80	8
11			x			2	E	0,80	9
12	x	x	x	x	x	2	D	2,10	4/7/10
13	x	x	x	x	x	2	E	2,10	5/11
14	x	x	x	x	x	2	D	2,10	12
15	x	x	x	x	x	2	E	2,10	13
16	x	x	x	x	x	3	D	0,30	8
17	x	x	x	x	x	3	E	0,30	9
18			x			3	D	0,30	10
19			x			3	E	0,30	11
20	x	x	x	x	x	3	D	0,30	12
21	x	x	x	x	x	3	E	0,30	13
22	x	x	x	x	x	3	D	0,30	14
23	x	x	x	x	x	3	E	0,30	15
24	x	x	x	x	x	3	D	1,10	16
25	x	x	x	x	x	3	E	1,10	17
26			x			3	D	1,10	18/24
27			x			3	E	1,10	19/25
28	x	x	x	x	x	3	D	1,10	20/26
29	x	x	x	x	x	3	E	1,10	21/27
30	x	x	x	x	x	3	D	1,10	22/28
31	x	x	x	x	x	3	E	1,10	23/29
32	x	x				3	F	2,50	P
33			x			3	F	4,20	P
34	x					3	C	1,40	0
35	x	x				3	C	1,40	32
36			x			3	C	1,50	33
37				x		3	C	1,20	0
38				x		3	F	20,00	P

Fig.3 – Caracterização das atividades do estudo de caso proposto por tipo de produto, estação de trabalho, posição na linha, tempo de execução e precedências

Fonte: Autor

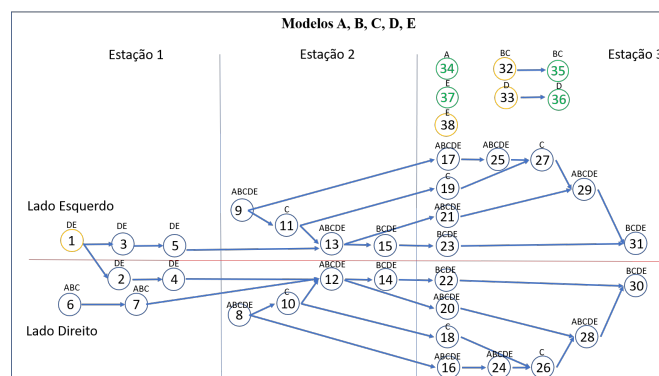


Fig.4 – Diagrama de Precedência – Todos tipos de caminhos
 Fonte: Autor

Passo 4: Cálculo do peso posicional por modelagem em rede de Petri colorida no software CPN Tools. A seguir serão demonstradas as principais etapas para construir o modelo.

Etapa A – Nesta etapa serão construídos os níveis principais de cada lado da linha. O algoritmo dos pesos posicionais é uma somatória de tempos em que é dada prioridade de execução para a atividade com o maior peso posicional, então optou-se em realizar a modelagem no CPN Tools em uma sequência invertida em relação ao diagrama de precedências. A Fig. 5 ilustra o trecho inicial do lado direito da linha.

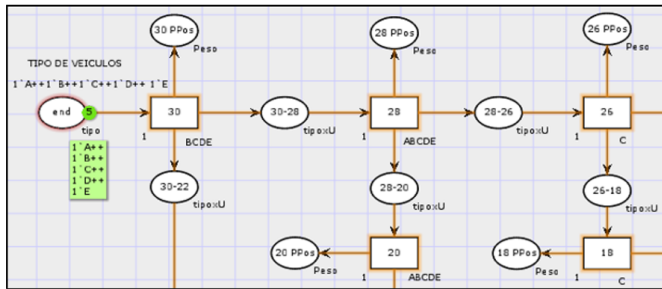


Fig.5 – Trecho inicial - lado direito da linha - Nível Principal
Fonte: Autor

Etapa B – Nesta etapa, em ambos os lados da linha, com a utilização da ferramenta “Hierarchy” são construídos os subníveis para cada transição (atividades), a cada subnível criado tem-se uma aba (parte superior) para acesso, conforme ilustra a Fig. 6 para o lado direito da linha.

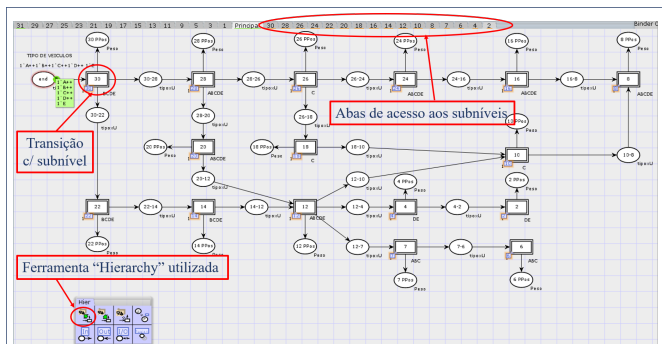


Fig. 6 – Criação dos subníveis das Atividades Lado Direito
Fonte: Autor

Os subníveis (funcionamento interno de cada transição) são formados pelas transições: atividade, alternativa, filtro de duplicidade, buffer, separadora e formatadora, conforme ilustra a Fig. 7, no exemplo tem-se o subnível da transição 7 (lado esquerdo da linha).

Etapa C – Nesta etapa é realizada a simulação para o cálculo do peso posicional. Utilizando o recurso “Simulation”, o modelo gera os pesos posicionais de cada atividade para cada tipo de veículo no nível principal. A Fig. 8 ilustra o nível principal do lado esquerdo da linha. O CPN Tools propicia vantagens para simular e validar o modelo. Com recursos básicos é possível construir uma parte do modelo e já simular. O programa evita acúmulo de erros, alertando a cada passo. Assim, é possível aperfeiçoar o modelo com o aprendizado e aplicação de novos recursos.

Etapa D – Nesta etapa é definida a sequência das atividades

de cada tipo de veículo, transferindo dados internos de cada subnível para uma rede no nível principal para convergir em um único lugar todos os pesos posicionais de forma que as marcas fiquem sequenciadas por tipo de veículo, conforme demonstra a Fig. 9. Os lugares fusion são criados com a caixa de ferramentas “Hierarchy - Fuses Places”, e conectam os subníveis ao nível principal. A utilização de expressões lógicas “if, then, else” nos arcos evitam a tramitação de marcas iguais a zero, conforme ilustra a Fig. 10.

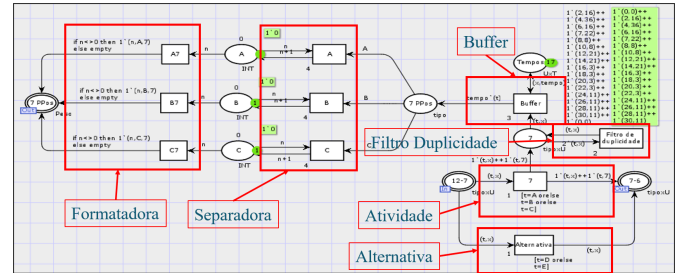


Fig. 7 - Transições que formam os subníveis. Ex. Subnível 7
Fonte: Autor

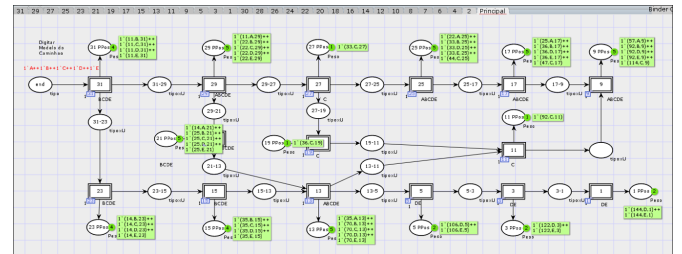


Fig. 8 - Nível Principal Pesos Posicionais – Lado Esquerdo
Fonte: Autor

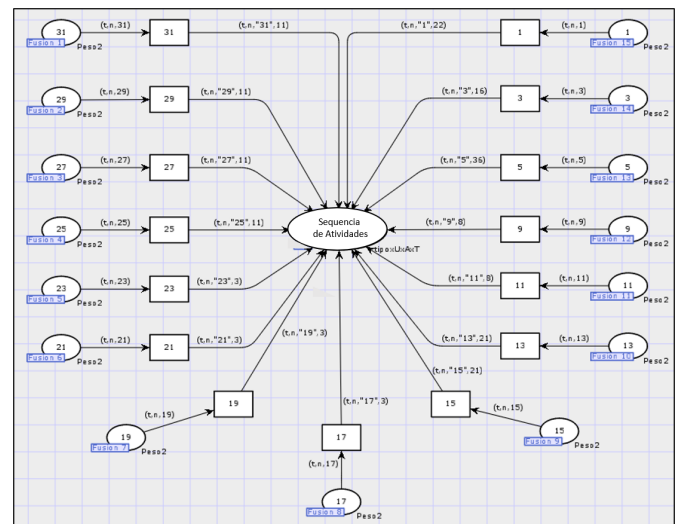


Fig. 9 – Rede de Convergência Lado Esquerdo
Fonte: Autor

Etapa E – Nesta etapa realiza-se a exportação dos resultados da simulação para um arquivo texto TXT único. São exportados conjuntos de dados com cinco variáveis (l, t, n, a, ti), onde “l” é o lado da linha, “t” é o tipo de veículo, “n” é o peso posicional, “a” é a atividade e “ti” é o tempo de duração. Os dados precisam estar no arco de saída da transição formatadora nos subníveis. Para exportar os dados foram criados três transições e dois lugares como mostra a Fig.11.

Durante a simulação, o CPN Tools exporta os resultados para um arquivo texto TXT, conforme ilustrado na Fig. 12. Os dados são exportados em 106 rodadas de simulação, em que a cada rodada, uma nova saída é adicionada no arquivo TXT, conforme o exemplo (LE, B, 35, 15, 21), onde LE é o lado da linha, B é o tipo de caminhão, 35 é o peso posicional, 15 é a atividade e 21 é o tempo.

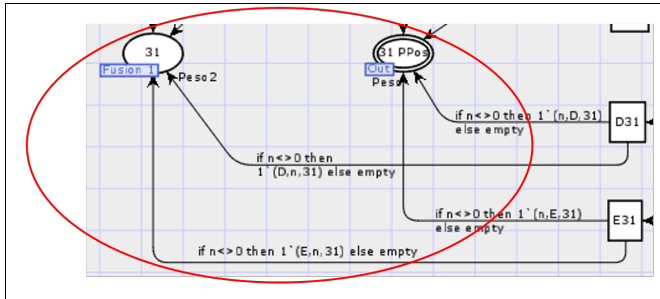


Fig. 10 – Subnível da Atividade 31 - Detalhe Lugar Fusion
 Fonte: Autor

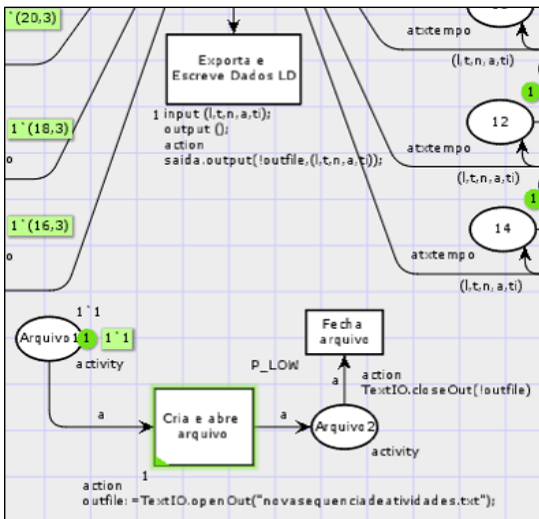


Fig. 11 – Transições para exportação de dados
 Fonte: Autor

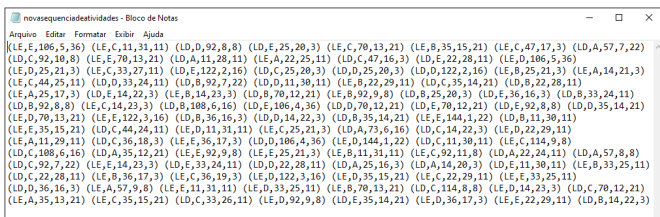


Fig.12 – Resultado exportado – Arquivo TXT
 Fonte: Autor

As declarações são parte integrante do modelo e estão situadas na área de índice. Existem as declarações padrão do CPN Tools e as específicas, criadas pelo usuário, conforme o modelo. A Fig. 13 demonstra o conjunto de todas as declarações para a realização deste modelo.

Passo 5: Após a exportação dos dados em TXT pelo CPN-Tools, os dados foram transferidos para um editor de planilhas. O editor permite aplicar filtros para determinar as

sequências de atividades a cada operador, separando por tipo de caminhão e por lado de linha. Essas sequências respeitam a priorização determinada pelo maior peso posicional. Após a aplicação do método dos pesos posicionais, são necessários “ajustes no balanceamento dinâmico das atividades para cada operador”. No editor de planilhas criou-se uma coluna com o tempo utilizado por cada operador, que é o tempo de serviço Ts, em cada tipo de caminhão.

```

▼Declarations
  ▶ Standard priorities
  ▼ Saida
    ▼ colset activity = int;
    ▼ var a:activity;
    ▼ colset tim = int;
    ▼ var ti:tim;
    ▼ colset atxtempo=product activity*tim;
  ▼ Standard declarations
    ▼ colset UNIT = unit;
    ▼ colset BOOL = bool;
    ▼ colset INT = int;
    ▼ colset INTINF = intinf;
    ▼ colset TIME = time;
    ▼ colset REAL = real;
    ▼ colset STRING = string;
    ▼ colset tipo=with A|B|C|D|E;
    ▼ colset lado=with LD|LE;
    ▼ colset T= INT;
    ▼ colset U= INT;
    ▼ colset UxT=product U*T;
    ▼ var t:tipo;
    ▼ var l:lado;
    ▼ var tempo,n:T;
    ▼ var x:U;
    ▼ colset tipoxU=product tipo*U;
    ▼ colset Peso=product T*tipo*U;
    ▼ colset Peso2=product lado*tipo*T*U;
    ▼ globref outfile = TextIO.stdOut;
    ▼ colset saida= product lado*tipo*U* activity*tim;
    
```

Fig.13 – Conjunto das declarações do modelo
 Fonte: Autor

O tempo utilizado de cada operador foi determinado com a alocação das atividades classe 1, respeitando a sequência do peso posicional, somando-se os tempos, desde que não excedam o Tc de 5,4 min (calculado a partir das estimativas: meta de produção de 80 produtos, eficiência da linha de 0,90 e tempo diário de 480 min). Por exemplo, para o Operador 1 no tipo de caminhão A, somou-se os tempos das atividades 9, 13, 17, 25 e 21, totalizando 4,6 min, se a próxima atividade, a 29, fosse somada totalizaria 5,7 min, excedendo Tc. Para aproximação do balanceamento perfeito, foram alocadas as atividades classe 2 e 3, que não respeitam as regras de precedência, somando-as as de classe 1, já alocadas na aplicação do método dos pesos posicionais. Por exemplo: para o Operador 1, no tipo de caminhão D foi incluída a atividade 36 (classe 2), obtendo um Ts = 5,3 min. Para os demais tipos de caminhão não foi possível o acréscimo de atividades. Para o Operador 2 não foi possível o acréscimo de atividades. Já para o Operador 3, no tipo de caminhão A foi incluída a atividade 34 (classe 2), obtendo um Ts = 3,5 min, para os demais não foi possível o acréscimo. E assim foram realizados os ajustes para os operadores 4, 5, 6, 7 e 8.

3.3 Resultados comparativos antes e após a aplicação da sistemática de balanceamento dinâmico

As Fig. 14 e 15 mostram as diferenças entre o balanceamento de linha antes e após a aplicação da sistemática de balanceamento dinâmico para o caminhão Tipo C. As diferenças também são significativas A, B, D e E.

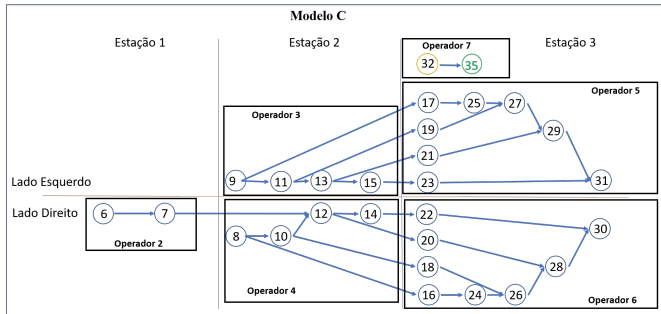


Fig.14 – Diagrama de precedência com o balanceamento de linha antes da aplicação da sistemática para o tipo C

Fonte: Autor

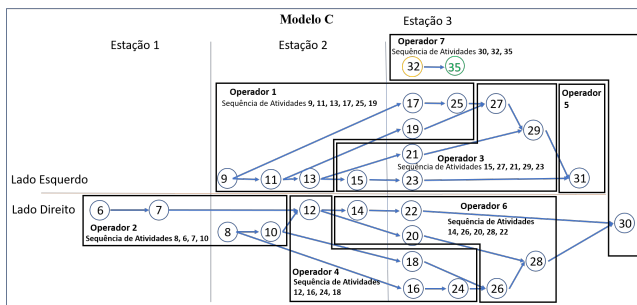


Fig.15 – Diagrama de precedência com o balanceamento de linha após a aplicação da sistemática proposta para o tipo C

Fonte: Autor

A Fig. 16, mostra o gráfico comparativo com os tempos de serviço (T_s) antes e após a aplicação da sistemática proposta para o operador 3 em cada tipo de caminhão. Destaca-se o fato de antes o T_s exceder o T_c para o tipo de caminhão C, o que causaria paradas no processo. Após a aplicação da sistemática o T_s passa a não exceder o T_c . Para os demais operadores o T_s também não excedeu o T_c em nenhum dos tipos de caminhões após a aplicação da sistemática proposta.

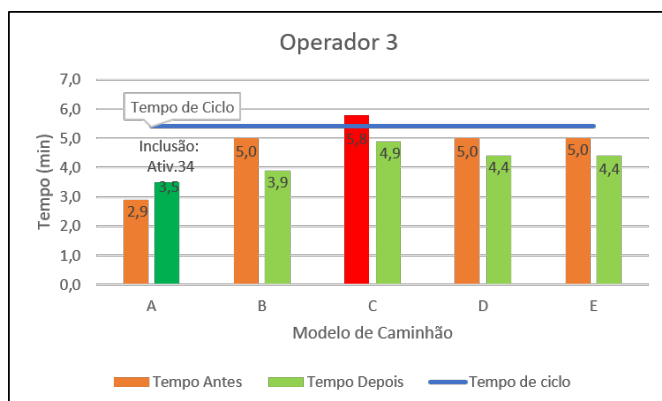


Fig.16 – Comparativo do tempo de serviço por caminhão para Operador 3 antes e após a aplicação da sistemática

Fonte: Autor

A Fig. 17 mostra a ocupação média dos operadores antes e após a aplicação da sistemática proposta. Antes, o

balanceamento requeria oito operadores com ocupação entre 46,3 a 79,9%, e com a aplicação da sistemática, balanceamento foi atualizado para sete operadores com ocupação entre 70,3 a 83,1%.

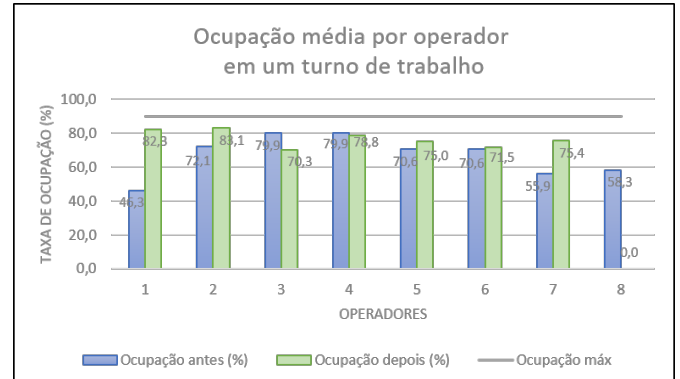


Fig.17 – Ocupação média por operador antes e após a aplicação da sistemática proposta

Fonte: Autor

4. CONCLUSÕES

A sistemática de balanceamento dinâmico proposta objetiva contribuir para o preenchimento de duas lacunas existentes nas pesquisas acadêmicas. A primeira lacuna é o fato de grande maioria das empresas não aplicar um método objetivo para distribuição das atividades. Tal distribuição, comumente, é realizada pelos gestores de produção, de acordo com sua experiência profissional. A segunda lacuna é a dificuldade de adequação do balanceamento de linha devido à grande variação entre os tempos das atividades dos diferentes tipos de produtos, agravada pelas alterações de curto prazo no sequenciamento destes produtos.

A aplicação do algoritmo heurístico dos pesos posicionais em um modelo em rede de Petri colorida, através do CPN-Tools, forneceu conjuntos de atividades específicos, com uma seqüência definida de forma lógica, para cada operador e para cada tipo de caminhão em processo. O algoritmo heurístico dos pesos posicionais é intuitivo e baseia-se em regras de prioridade, e, portanto, pode ser incorporado na cultura dos colaboradores e nos processos de melhorias contínuas.

A sistemática de balanceamento dinâmico proposta foi detalhada passo a passo, permitindo que o modelo em rede de Petri colorida possa ser construído por colaboradores sem a necessidade de conhecimento prévio em programação, o CPN Tools colabora facilitando a correção de erros, gerando alertas a cada passo da construção do modelo, e disponibilizando acesso gratuito. Desta forma, a sistemática proposta é viável para utilização nas empresas, servindo como ferramenta de embasamento aos gestores das linhas, durante a distribuição das atividades aos operadores.

A sistemática de balanceamento dinâmico possibilitou uma distribuição de atividades aos operadores, que reduziu o impacto das diferenças entre os tipos de produtos, e também das alterações de curto prazo no sequenciamento de produtos. Ao redistribuir os conjuntos de atividades que excediam o tempo de ciclo, e passando a ter todos os conjuntos de

atividades menores ou iguais ao tempo de ciclo, reduziu-se substancialmente a dependência do sequenciamento de produtos, uma vez que não é mais mandatório ter um tipo com conjuntos de atividades de tempos menores, sucedendo a outro que excedeu ao tempo de ciclo como compensação. No estudo de caso houve redução significativa dos recursos, de 8 para 7 operadores (12,5%), mantendo os operadores com ocupação média entre 70,3 e 83,1%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) por todo apoio recebido na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Banks, C. M. (2010). *Introduction to Modeling and Simulation Fundamentals: Theoretical Underpinnings and Practical Domains*, v.1, p.1–24. [S.l.]: Wiley.
- Boysen, N., Flidner, M., and Scholl, A. (2008). Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*, v. 111, n. 2, p. 509–528.
- Boysen, N., Schulze, P., and Scholl, A. (2022). Assembly Line balancing: What happened in the last fifteen years? *European Journal of Operational Research*, v. 301, n. 3, p. 797–814.
- Cerbaso, C., Silvestri, A., and Bona, G. (2017). Assembly line balancing, proposal of a new methodology: Integrated balancing method. *International Journal of Services and Operations Management*, v.27, n.3, p. 408–437.
- Costa, D., Miri, D., Chais, C., Matte, J., Ganzer, P., and Ole, P. (2019). Eficiência no abastecimento de Materiais em uma linha de montagem multiproduto. *Revista Gestão em Análise*, v.8, n.2, p.61.
- Ferreira, W. P., Armellini, F., and Santa-Eulália, L. A. (2020). Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. *Computers and Industrial Engineering*, v. 149, n. January, p. 106868.
- Goldratt, E. M., and Cox, J. (2006). *A meta: um processo de melhoria contínua*. [S.l.]: NBL Editora.
- Groover, M. P. (2011). *Automação industrial e sistemas de manufatura*. [S.l.]: Pearson Brasil.
- Groover, M. P. (2017). *Fundamentos da moderna manufatura*. Tradução Givanildo Alves dos Santos, Luiz Claudio de Queiroz, v. 5. [S.l.]: LTC.
- Helgeson, W. B., and Birnie, D.P. (1961). Assembly Line Balancing Using the Ranked Positional Weight Technique. *Journal of Industrial Engineering* 12 (6): 394-398.
- Igei, P., Cugnasca, C., Junqueira, F., and Miyagi, P. (2011). Modeling of collaborative production Systems using Coloured Petri nets. PECCS 2011 - *Proceedings of the 1st International Conference on Pervasive and Embedded Computing and Communication Systems*, p. 257–260.
- Jensen, K., and Kristensen, L.M. (2009). *Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Cocurrent Systems*, Springer-Verlag, New York Inc.
- Jiao, Y. L., Jin, H. Q., Xing, X. C., Li, M. J., and Liu, X. Ran. (2021). Assembly line balance research methods, literature and development review. *Concurrent Engineering Research and Applications*, v. 29, n. 2, p. 183–194.
- Kharuddin, M. H., and Ramli, M. F. (2020). A Review on Methods to Improve and Balance the Assembly Line. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 767, n. 1.
- Kaneshiro, P. J. I. (2011). Proposta De Um Procedimento Para a Modelagem De. *Universidade de São Paulo*
- Kucukkoc, I., and Zhang, D. Z. (2016). Mixed-model parallel two-sided assembly line balancing problem: A flexible agent-based ant colony optimization approach. *Computers and Industrial Engineering*, v. 97, p. 58–72.
- Law, A. M. (2019). How to Build Valid and Credible Simulation Models. *Proceedings – Winter Simulation Conference*, v. 2019- Decem, p. 1402–1414.
- Murata, T. (2015). Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. *Proceedings of the IEEE*, v. 77, n. 4, p. 541–580.
- Neves, C. C. B., Oliveira, D. C., Asato, O. L., Kaneshiro, P. J. I., and Nakamoto, F. Y. (2021). Planejamento dinâmico da produção e capacidade funcional do Sistema produtivo. In: *14th IEEE International Conference on Industry Applications*.
- Noce, F. S. (2017). Uma abordagem para a Modelagem, Análise e Simulação de processos de negócios interorganizacionais baseada nas WorkCow nets e na ferramenta CPN Tools. *Universidade Federal de Uberlândia*.
- Pereira, F. P., Asato, O. L., Kaneshiro, P. J., and Nakamoto, F.Y. (2021) Modeling and simulation of the baby diaper production system using colored Petri net, In *26th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*.
- Petri, C.A. (1962). Kommunikation mit Automaten. *Bonn: Institut für Instrumentelle Mathematik, Schriften des IIM Nr.3*.
- Poli, G. A., Saviani, T. N., and Júnior, I. G. (2018). Logística 4.0: Uma Revisão Sistemática. *International Conference on Network Enterprises & Logistics Management, June, 2018*, p. 100-109.
- Pröpster, M., Märs, L., Reinhart, G., and Intra, C. (2015). Validation of line balancing by simulation of workforce flexibility. *Procedia CIRP*, v.33, p.93–98.
- Sime, H., Jana, P., and Panghal, D. (2019). Feasibility of Using simulation technique for line balancing in apparel industry. *Procedia Manufacturing*, v. 30, p. 300–307.
- Stevan, S. L. J., Leme, M. O., and Santos, M. M. D. (2018). *Indústria 4.0: fundamentos, perspectivas e aplicações*. [S.l.]: Erica, São Paulo.
- Zhou, M., and DICESARE, F. (1993). *Petri net: synthesis for Discrete event control of manufacturing systems*. [S.L.]: Springer, p. 256.