

SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS COM BALANCEAMENTO DE LINHA DE PRODUÇÃO: UMA APLICAÇÃO NA MANUFATURA

Leila Figueiredo Dantas

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)
R. Marquês de São Vicente, 225 - Gávea, Rio de Janeiro - RJ, 22451-900
leilaffdantas@gmail.com

Fernando Luiz Cyrino Oliveira

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)
R. Marquês de São Vicente, 225 - Gávea, Rio de Janeiro - RJ, 22451-900
cyrino@puc-rio.br

Igor Tona Peres

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)
R. Marquês de São Vicente, 225 - Gávea, Rio de Janeiro - RJ, 22451-900
igor.peres@aluno.puc-rio.br

RESUMO

Diante da necessidade da organização em reduzir cada vez mais os custos de produção devido à concorrência, o estudo do balanceamento de linhas visa a configuração de sistemas de montagem mais eficientes, ao mesmo tempo em que as aplicações bem-sucedidas de simulação provam a sua eficácia em vários problemas no setor manufatureiro. Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo a aplicação do balanceamento de linha combinada à simulação de eventos discretos em uma linha de montagem, permitindo melhorias no processo de produção, com o intuito de atender a demanda e reduzir custos. São realizados o balanceamento e a construção de modelos de simulação computacional para os processos da linha não balanceada e balanceada. Os resultados obtidos mostraram que a combinação das duas técnicas aumentou em 3,8% a produção média diária, diminuiu em cinco unidades a mão-de-obra necessária, e reduziu estoques intermediários e taxas de ociosidade.

PALAVRAS-CHAVE. Balanceamento de linha de montagem, Simulação de Eventos Discretos, Manufatura.

Tópicos (PO na Indústria, Simulação)

ABSTRACT

Due to the need for an organization to reduce your production costs because of competition, the study of the line balancing aims to generate more efficient assembly systems, while the successful applications of simulation show their effectiveness in much problems in the manufacturing. In this context, this paper aims to apply the line balancing combined with discrete event simulation in an assembly line, to improve the production process, in order to meet the demand and reduce costs. The balancing and the construction of computer simulation models for the line are performed. The results showed that the combination of the two techniques increased by 3.8% daily production, decreased the labor by five unit, and reduced intermediate stocks and idle rates.

KEYWORDS. Assembly line balancing, Discrete Event Simulation, Manufacturing.

Paper topics (OR in Industry, Simulation)

1. Introdução

Nos últimos anos, as empresas de manufatura estão competindo em um ambiente cada vez mais dinâmico. O aumento do número de concorrentes, as constantes inovações introduzidas no mercado e a redução do ciclo de vida dos produtos forçam as empresas a uma melhoria constante dos seus processos. Por esta razão, precisam dedicar mais esforços e recursos a fim de competir e continuar a gerar lucro, necessitando reduzir cada vez mais os custos de produção [Pita e Wang 2010].

Tendo em vista essa necessidade das organizações, o estudo do balanceamento de linhas visa apoiar o tomador de decisão na configuração de sistemas de montagem mais eficientes [Boysen et al. 2008]. De mesmo modo, a simulação também tem desempenhado um papel significativo na avaliação do desempenho operacional dos sistemas de manufatura, e suas aplicações bem-sucedidas provaram a sua eficácia na abordagem de vários problemas no setor manufatureiro [Negahban e Smith 2014].

Os primeiros trabalhos que propuseram o problema de balanceamento da linha de montagem surgiram em 1961 [Grzechca 2011] e, desde então, muitos autores apresentaram abordagens e diferentes estudos de caso de balanceamento das linhas como, por exemplo, Bukchin e Rubinovitz (2003), Becker e Scholl (2006), Boysen et al. (2008). O balanceamento consiste em equilibrar a carga de trabalho entre os postos para que o tempo não útil seja reduzido, cumprindo as tarefas em ordens de execução e no tempo estabelecido, com o principal objetivo de aumentar a produtividade da linha e, conseqüentemente, reduzir os custos associados [Vieira 2009].

A simulação tem sido usada por décadas como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão em sistemas de manufatura, sendo muito mais barato e rápido construir um sistema virtual e experimentar com diferentes cenários e decisões antes de realmente implementá-lo. Um dos métodos utilizados na simulação dos sistemas de produção é a Simulação de Eventos Discretos, sendo uma das técnicas mais utilizadas para analisar e compreender a dinâmica de sistemas de manufatura [Negahban e Smith 2014], e a sua aplicação na área pode ser vista em alguns trabalhos, como os de Souza e Ying (1999), Spedding e Sun (1999), Pfeil et al. (2000).

Dentro deste contexto, o objetivo do trabalho é aplicar o balanceamento combinado à simulação de eventos discretos em uma linha de montagem, permitindo "*what-if*" cenários e, portanto, uma melhoria no processo de produção. Essas duas técnicas já foram combinadas anteriormente, e podem ser vistas nos trabalhos de Mendes et al. (2005), Das et al. (2012), Zupan e Herakovic (2015).

A justificativa para o presente estudo é a necessidade de atender a demanda e reduzir os custos de produção em uma linha de montagem de uma fábrica de produtos elétricos que, mesmo com um número suficiente de mão de obra, não consegue cumprir os prazos de entrega, sendo as perdas com desbalanceamento um dos motivos para esse não cumprimento. Assim, espera-se que, além de atender a demanda, seja minimizado o número necessário de colaboradores, os estoques intermediários e o tempo ocioso.

O método usado no balanceamento foi o Heurístico de Utilização Incremental, proposto por Gaither e Frazier em 2002, e para o desenvolvimento do modelo de simulação computacional foi utilizado o *software* Arena® versão 14.70.

A estrutura do presente trabalho é dividida em seções. A Seção 2 discute a literatura já existente sobre o balanceamento de linha e a simulação de eventos discretos. A Seção subsequente retrata a configuração da linha de produção em estudo. A Seção 4 apresenta o modelo de simulação da linha atual e balanceada, o balanceamento, e os resultados da simulação. A Seção 5 compara os modelos e discute os resultados obtidos. Finalmente, as conclusões são apresentadas na Seção 6.

2. Revisão da literatura

2.1. Balanceamento de linha

O balanceamento da linha de montagem é usado com o objetivo de minimizar o número de estações de trabalho necessárias para determinado tempo de ciclo e equilibrar as cargas nessas estações (problema do Tipo I), ou para minimizar o tempo de ciclo da linha dado um número fixo de estações de trabalho (problema do Tipo II). O objetivo de ambos é minimizar o tempo ocioso e, conseqüentemente, melhorar a eficiência da produção [Das et al. 2012]. Os problemas do Tipo I tentam atribuir trabalhadores de tal forma que o número total necessário é minimizado, dado um tempo de ciclo especificado [McMullen e Frazier 1997], sendo este o problema em questão.

Segundo Gaither e Frazier (2002), a estação de trabalho é definida como uma localização física onde uma tarefa ou um conjunto particular de tarefas é executado, e um centro de trabalho como uma localização física onde as estações de trabalho estão localizadas. Quando é exigido que mais de uma estação de trabalho ofereça capacidade de produção suficiente, elas passam a ser combinadas para formar um centro de trabalho.

A maioria das pesquisas de balanceamento de linha pressupõe que os tempos de operação são determinísticos [McMullen e Frazier 1997] [Becker e Scholl 2006]. Porém, os tempos possuem natureza estocástica, visto que há sempre alguma variação quando os seres humanos realizam as tarefas, e essa variação tem um maior impacto com tempos de ciclo mais curtos, sendo a inconstância das atividades um dos fatores dessa variabilidade [McMullen e Frazier 1997].

O balanceamento deve seguir as seis etapas abaixo [Gaither e Frazier 2002]:

- a) Determinar quais tarefas devem ser executadas e sua ordem ou seqüência;
- b) Traçar um diagrama de precedência;
- c) Estimar as durações das tarefas;
- d) Calcular o tempo de ciclo;
- e) Calcular o número mínimo de estações de trabalho;
- f) Utilizar uma regra para atribuir tarefas a estações de trabalho de forma que a linha de produção seja balanceada.

O Tempo Padrão (TP), segundo Slack (2009), refere-se ao tempo permitido para a realização do trabalho sob circunstâncias específicas, incluindo as Tolerâncias (T) para pausa e descanso, que devem ser permitidas devido às condições sob as quais o trabalho é realizado. O tempo cronometrado, chamado de Tempo Normal (TN), não pode ser o utilizado, já que uma série de eventos ocorre durante o dia de trabalho, fazendo com que a produção final obtida seja efetivamente menor do que a que seria calculada com o tempo encontrado. Assim sendo, as pausas não podem ser atribuídas de forma direta às operações, mas devem ser acrescidas ao TN, resultando no TP [Moreira 2012], segundo a equação (1).

$$TP = TN \times \frac{100}{100 - T} \quad (1)$$

A tolerância são acréscimos feitos ao TN para dar ao trabalhador a oportunidade de recuperar-se de efeitos fisiológicos ou psicológicos resultantes da execução do trabalho sob condições específicas e para atender as necessidades pessoais, com valor tabelado [Moreira 2012].

O Tempo de Ciclo (TC) representa o tempo em que um produto é produzido, e pode ser calculado pela equação (2) apresentada por Zupan e Herakovic (2015), onde o fator de escala para a quantidade de resíduo é considerado.

$$TC = \frac{\text{tempo produtivo de duração do turno} \times n^{\circ} \text{ de turnos}}{\text{necessidade de produção} \times \text{fator de escala para a quantidade de resíduos}} \quad (2)$$

Se houver uma ou mais tarefas com tempos superiores ao tempo de ciclo desejado, o paralelismo de estações pode resolver este conflito. Na ligação em paralelo, existem duas estações idênticas, que realizam as mesmas funções. Mesmo com uma única linha, as vantagens do paralelismo podem ser utilizadas pela instalação de estações paralelas, isto é, as peças de trabalho são distribuídas entre os vários operadores que realizam as mesmas funções [Becker e Scholl 2006].

A necessidade de usar estações em paralelo está a cumprir altas taxas de produção quando o trabalho excede o tempo de ciclo necessário [Bukchin e Rubinovitz 2003].

O número mínimo de estações de trabalho é o menor número de estações de trabalho que pode fornecer a produção exigida [Gaither e Frazier 2002], e pode ser calculado segundo a equação (3) apresentada por Zupan e Herakovic (2015), não levando em consideração o nível de impacto dos trabalhadores.

$$\text{Número mínimo de estações de trabalho} = \sum_i^n \frac{\text{tempo padrão}_i}{\text{tempo de ciclo}_i} \quad (3)$$

Em que $i = \{1, \dots, n\}$ e n é número total de postos de trabalho.

Métodos heurísticos têm sido usados para desenvolver boas soluções para os problemas de balanceamento de linha. Eles não garantem uma solução ótima, mas resultam em boas soluções viáveis, sendo a maioria projetada para resolver problemas de balanceamento de linha de montagem [Grzechca 2011]. Entre esses métodos estão a regra heurística de Utilização Incremental. Sob certas circunstâncias, entretanto, essa regra cria a necessidade de ferramentas e equipamentos extras. Se o foco principal da análise for minimizar o número de estações de trabalho e/ou se as ferramentas e equipamentos usados na linha de produção forem ou abundantes ou baratos, essa regra é apropriada [Gaither e Fraizer 2006].

Após o balanceamento, calcula-se a utilização da linha através da equação (4), que fornece a porcentagem de tempo que uma linha de produção trabalha [Gaither e Frazier 2002].

$$\text{Utilização} = \frac{\text{número mínimo de estações de trabalho} \times 100}{\text{número real de estações de trabalho}} \quad (4)$$

2.1.1. Método heurístico de Utilização Incremental

Essa regra é proposta por Gaither e Frazier (2002), e funciona simplesmente acrescentando estações a centros de trabalho em ordem de precedência de tarefa, uma de cada vez, até que a utilização seja de 100% ou se observe que tal utilização caia. Então, esse procedimento é repetido no centro de trabalho seguinte para as tarefas restantes. Ela é apropriada quando uma ou mais durações de uma estação de trabalho são iguais ou maiores do que a duração do ciclo.

A vantagem dessa regra é que ela é capaz de resolver problemas de balanceamento independentemente da duração das tarefas em relação à duração do ciclo [Gaither e Frazier 2002].

2.2. Simulação de Eventos Discretos

Um modelo de simulação pode ser considerado como um conjunto de regras que definem como o sistema que está sendo modelado irá mudar no futuro, dado o seu estado atual, e, em geral, é uma melhor resposta para problemas complexos onde a dinâmica do tempo é importante [Borshchev e Filippov 2004].

O desenvolvimento de um modelo de simulação compõe-se de três grandes etapas: concepção, implementação e análise dos resultados, responsáveis por, respectivamente, entender claramente o sistema a ser simulado e os seus objetivos, converter o modelo conceitual em um modelo computacional, validá-lo e realizar experimentos, efetuando várias replicações do modelo e analisando os resultados [Chwif e Medina 2006].

A Simulação de Eventos Discretos (SED) leva em consideração a mudança de estado do sistema ao longo do tempo, e é utilizada para modelar sistemas que mudam o seu estado em momentos discretos no tempo, a partir da ocorrência de eventos [Chwif e Medina 2006]. Sakurada e Miyake (2009) afirmam que eventos discretos são caracterizados por serem modificados em intervalos específicos de tempo, e definem simulação como uma ferramenta de apoio à tomada de decisões, através da representação de sistemas reais.

Os sistemas reais geralmente apresentam uma maior complexidade devido, principalmente, à sua natureza dinâmica e aleatória, e o modelo de simulação consegue capturar com mais fidelidade essas características, procurando repetir em um computador o mesmo comportamento que o sistema apresentaria quando submetido às mesmas condições de contorno

[Chwif e Medina 2006]. Um modelo de simulação computacional pode ser usado como uma ferramenta para avaliar o desempenho de uma linha de montagem com tempos de operação estocástica [Das et al. 2012], e a distribuição das variáveis aleatórias pode ser aproximada por um modelo probabilístico conhecido e encontrado em pacotes comerciais, através de testes de aderência [Chwif e Medina 2006].

3. Configuração da linha de produção em estudo

O processo de produção em estudo consiste em uma linha de montagem de produtos elétricos composta de 25 postos de trabalho em sequência, nomeados de A a Y e é caracterizada como um sistema de produção em massa com dependência de muita mão de obra. A demanda varia ao longo do ano, e para este estudo, será utilizada a meta mensal constante de 6000 produtos, com 41 colaboradores trabalhando diretamente na montagem do produto.

As entradas do processo são as matérias-primas transformadas no decorrer da linha, que são, em média, 7000 por dia, com chegada constante única no início do dia (ficam estocadas na estante próxima ao posto de trabalho, que é reabastecido sempre que necessário). Os resultados dessa transformação serão os produtos acabados. As peças podem ser descartadas por algum tipo de defeito durante o processo, sendo de valor significativo nos postos de trabalho D, L e Q, com 5%, 5% e 1,5% de resíduo, respectivamente. A tarefa D e suas antecessoras, por exemplo, devem produzir 11,5% a mais que a quantidade demandada, visto que esse valor será perdido no decorrer do processo, durante os 3 postos de trabalho citados acima. Assim sendo, as porcentagens da quantidade perdida nesses postos serão levadas em conta no cálculo do TC, dividindo assim a linha em quatro tempos de ciclos diferentes.

O processo de produção opera em um turno, cinco dias por semana, durante 8,8 horas por dia de trabalho. Como ocorrem pausas para a prática da ginástica laboral e revezamento de função devido a monotonia do trabalho, o tempo de trabalho produtivo considerado é de oito horas. As montagens são transportadas por esteiras entre os postos de trabalho, e os tempos de transferência das peças semiacabadas entre todos os postos são negligenciados devido à proximidade dos mesmos. A disciplina da fila é a FIFO (*First In First Out*), na qual o primeiro produto a entrar na fila é o primeiro a sair.

O tempo gasto pelo operador em cada posto é uma variável aleatória. Apesar de não se saber o seu valor exato, pode-se simular o seu comportamento probabilístico, a partir da medição dos tempos de processamento que o operador consumiu, no passado, realizando a mesma operação.

Os tempos serão tratados de forma determinística para o estudo do balanceamento, e de forma estocástica, no modelo de simulação.

4. Modelo de simulação da linha existente e resultado da simulação

Após definir o problema a ser solucionado, foram coletadas todas as informações necessárias para a construção do modelo, definidas como dados de entrada, que são: a programação do número de colaboradores em cada posto de trabalho, a porcentagem de produto descartado ao longo da linha, e as amostras dos tempos de processamento de cada posto. O modelo parte da premissa que as amostras devem representar uma sequência de valores independentes e identicamente distribuídos, ou seja, não existem correlações entre as observações que compõem a amostra. A partir das informações recolhidas, é criado e validado o modelo conceitual (Figura 1).

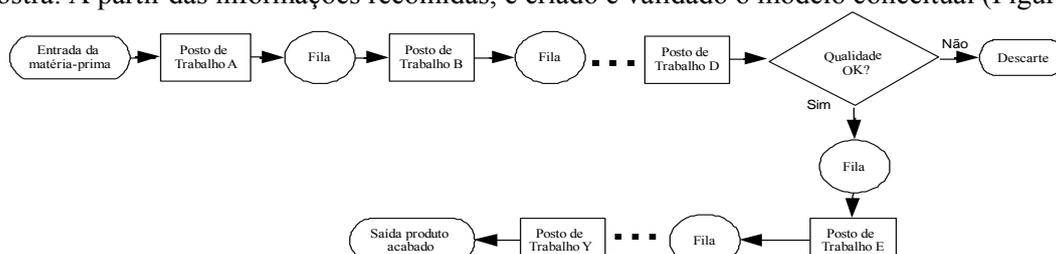


Figura 1 – Modelo conceitual da linha de produção atual

Na sequência, o modelo foi então implementado no *software* Arena® versão 14.70, ilustrando o estado atual e incluindo todos os recursos da produção atual. O comportamento do modelo implementado passa então pela fase da verificação, onde verifica se o comportamento do modelo computacional está de acordo com o modelo conceitual. Após o modelo computacional ser verificado, foram realizados os experimentos.

O modelo de simulação atual, também chamado de "não-balanceado", descreve o estado atual da linha de produção não otimizada, e é construído de acordo com os tempos de processamento estocásticos, seguindo uma distribuição estatística, onde cada colaborador realiza apenas um único posto de trabalho por vez. A distribuição das variáveis aleatórias pode ser aproximada por um modelo probabilístico conhecido e encontrado no próprio Arena® na ferramenta *Input Analyzer*, através de testes de aderência *Kolmogorov-Smirnov* com nível de significância de 5%. Para cada posto de trabalho, as distribuições de probabilidade podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1: Distribuição de probabilidade de cada posto de trabalho

Posto de trabalho	Distribuição de probabilidade	Posto de trabalho	Distribuição de probabilidade
A	$3.53 + \text{ERLA}(0.202, 6)$	N	$2.24 + \text{ERLA}(0.266, 5)$
B	$6.68 + 2.64 * \text{BETA}(1.74, 1.81)$	O	$4.37 + 3.63 * \text{BETA}(1.4, 1.3)$
C	$7 + 8 * \text{BETA}(0.914, 1.46)$	P	$5 + \text{ERLA}(0.278, 3)$
D	$3.13 + 4.87 * \text{BETA}(1.79, 1.84)$	Q	$\text{NORM}(6.21, 1.07)$
E	$4 + \text{WEIB}(2.07, 2.28)$	R	$2.27 + 1.91 * \text{BETA}(3.23, 5.63)$
F	$4.16 + 2.84 * \text{BETA}(1.99, 1.95)$	S	$\text{TRIA}(2.01, 2.18, 2.81)$
G	$8 + 8.97 * \text{BETA}(0.842, 1.31)$	T	$\text{TRIA}(2.21, 4.32, 4.89)$
H	$4 + 5 * \text{BETA}(1.67, 1.61)$	U	$\text{TRIA}(4.53, 6.18, 8.34)$
I	$6.61 + \text{WEIB}(1.47, 2.71)$	V	$4.59 + 3.8 * \text{BETA}(2.3, 1.82)$
J	$4.49 + 2.94 * \text{BETA}(2.11, 2.16)$	W	$\text{NORM}(3.04, 0.387)$
K	$\text{TRIA}(2.68, 3.07, 3.76)$	X	$4 + \text{ERLA}(0.258, 3)$
L	$6.26 + 7.74 * \text{BETA}(2.45, 1.78)$	Y	$4.66 + 3.67 * \text{BETA}(2.06, 2.11)$
M	$9 + 8.97 * \text{BETA}(2.92, 3.6)$		

Apesar do sistema possuir um turno claro de operações, optou-se pela simulação não terminal, visto que no final do período os processos são momentaneamente paralisados de tal forma que no dia seguinte são retomados no mesmo ponto, pois a parada que ocorre ao final do turno não é, do ponto de vista da simulação, uma parada final do sistema. Para a simulação não terminal, é necessário encontrar o tempo de *warm-up*, que é o tempo de aquecimento do sistema, e que segundo Chwif e Medina (2006) serve para eliminar dos dados de saída todos os valores gerados durante o período transitório. Ele foi determinado através da construção de um gráfico com os valores observados da quantidade produzida em função do tempo (Figura 2). Através da observação deste gráfico, tenta-se determinar a partir de que momento o parâmetro parece não estar mais sendo influenciado pelas condições iniciais do sistema, ou seja, quando ele entra no estado de regime permanente.

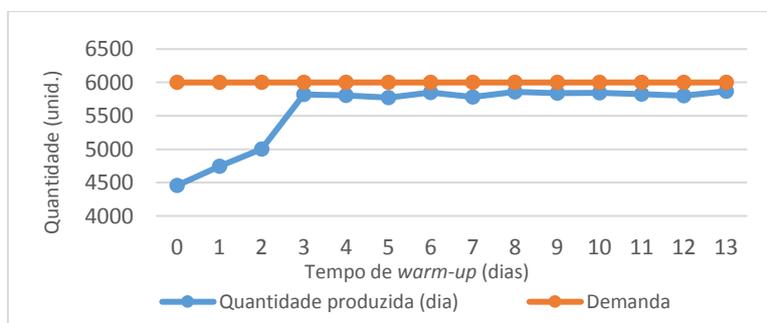


Figura 2 –Tempo de *warm-up*

Depois de uma corrida de simulação para um período total de cinco dias de trabalho, sendo quatro desses dias o tempo de *warm-up*, e feitas 100 replicações, os resultados da simulação são obtidos da média dessas replicações para um dia de trabalho. As variáveis de saída de interesse para o estudo foram: quantidade média de 5819 produtos acabados, quantidade média de produtos

na fila em cada posto de trabalho (estoque intermediário) e porcentagem de utilização dos colaboradores, esses últimos apresentados nas Figuras 3 e 4, respectivamente. Esses resultados foram validados computacionalmente, comparando-os com o processo real, onde a quantidade média de produtos acabados no mês em estudo foi de 5653 produtos, com uma diferença menor que 3%.

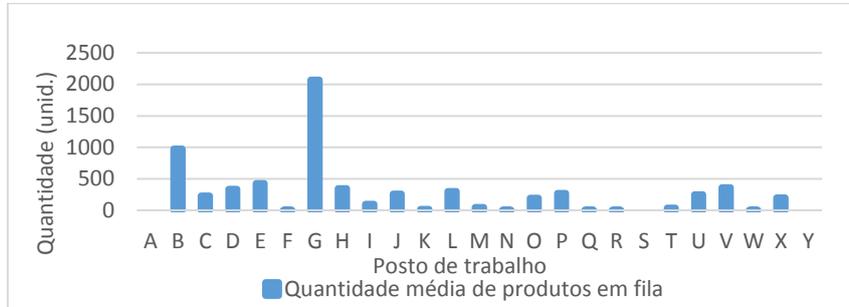


Figura 3 – Estoque intermediário entre os postos de trabalho da linha não-balanceada

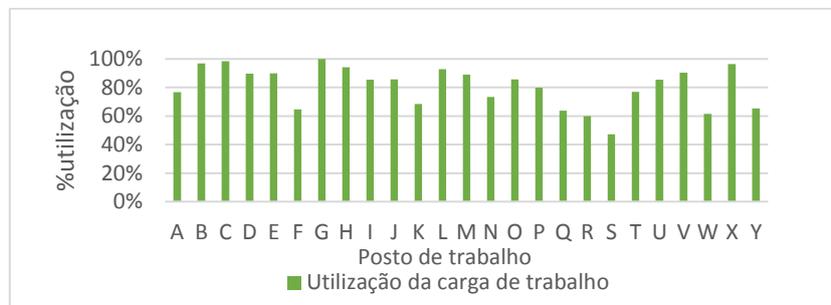


Figura 4 – Utilização da carga de trabalho em cada tarefa da linha não-balanceada

Os resultados mostram que existem custos desnecessários no modelo existente de produção, visto que há desequilíbrio da carga de trabalho e dos estoques intermediários, afetando assim a eficiência da linha. Existe uma média de 2070 peças em fila na tarefa G, que tem utilização de 100%, sendo esta o gargalo do processo. Pode-se ver também que enquanto alguns postos possuem carga perto de 100% de utilização, há outro trabalhando na média de 50% de ociosidade. Uma vez que os resultados da simulação mostram desperdícios, o balanceamento da produção atual deve ser realizado com a ajuda das equações estabelecidas na Seção 2. O estoque médio do posto de trabalho A não é contabilizado, visto que ele possui todas as peças disponíveis em estoque no início do dia. Percebe-se que ele não é um gargalo para o sistema observando sua porcentagem de utilização.

4.1. Balanceamento das operações

Como a configuração da linha de produção existente não consegue suprir toda a demanda, o objetivo é minimizar o tempo ocioso de forma que essa demanda passe a ser atendida, além de balancear os estoques intermediários e a carga de trabalho. Com esse intuito, foi realizado o balanceamento da linha.

Os TPs foram encontrados a partir da média dos tempos cronometrados, chamados de TN, adicionado a um fator de 13% de tolerância, onde 5% equivale ao tempo pessoal necessário, 4% é relacionado à fadiga, e os outros 4% devido à alta monotonia do trabalho. Esses valores são tabelados e podem ser encontrados no livro de Moreira (2012). Como explicado anteriormente, a tolerância dá ao trabalhador a oportunidade de recuperar-se de efeitos resultantes da execução do trabalho sob condições específicas, sendo este fator particular a cada tipo de trabalho e empresa. Para o cálculo, a equação (1) é utilizada. As tarefas, a ordem de precedência e seus respectivos tempos podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Tempo Normal e Padrão de cada tarefa

Tarefas	Tarefas de precedência	Média do Tempo Normal/cronometrado (segundos)	Tolerância (em %)	Tempo Padrão (segundos)
A. COLOCAR FIO TERRA NA CAIXINHA	-	4,13	13	4,74
B. PRENSAR GARRAS DO DIAFRAGMA	A	6,94	13	7,98
C. PASSAR FIO TERRA PELO DIAFRAG.	B	8,89	13	10,22
D. ENCAIXE DO DIAFRAGMA	C	4,81	13	5,53
E. COLOCAÇÃO ANEL TRAVA	D	5,08	13	5,84
F. MOLA NA PLATAFORMA	E	4,87	13	5,59
G. COLOCAR PLATAFORMA SOBRE DIAFRAGMA	F	10,03	13	11,53
H. PRENSAR PLATAFORMA	G	5,70	13	6,55
I. COLOCAR ESPAGUETE	H	6,89	13	7,91
J. COLOCAR TRAVA	I	5,17	13	5,94
K. COLOCAÇÃO ARRUELA DE SAÍDA FINA	J	2,73	13	3,14
L. TESTE DE VAZAMENTO	K	9,35	13	10,75
M. COLOCAÇÃO DO PINO E ROTOR	L	11,32	13	13,02
N. COLOCAÇÃO DA TAMPA	M	3,10	13	3,57
O. COLOCAÇÃO DA RESISTÊNCIA	N	5,44	13	6,25
P. COLOCAÇÃO DO BOJO	O	5,08	13	5,83
Q. TESTE DE SENSIBILIDADE	P	5,40	13	6,21
R. LIMPEZA	Q	2,57	13	2,96
S. PASSAR PRIME	R	2,03	13	2,33
T. GRAVAÇÃO	S	3,18	13	3,66
U. FITA LACRE	T	5,52	13	6,35
V. EMBALAR	U	5,84	13	6,71
W. SELAR O SAQUINHO	V	2,65	13	3,05
X. GRAMPEAR CARTELA	W	4,15	13	4,78
Y. COLOCAR NA CAIXA	X	5,63	13	6,47
Total		136,50		156,90

Para determinar o tempo de ciclo e o número mínimo necessário de estações de trabalho, foram utilizadas as equações (2) e (3), respectivamente. A linha foi dividida em quatro tempos de ciclo, como já explicado anteriormente, devido ao descarte de produtos defeituosos no decorrer do processo. Eles são apresentados na Tabela 3, e o número mínimo de estações de trabalho calculado foi 33,69.

Tabela 3 – Tempos de Ciclo

i	TC _i	Postos de trabalho	Porcentagem produzida de defeitos/resíduos
1	4,30	A à D	11,5%
2	4,51	E à L	6,5%
3	4,73	M à Q	1,5%
4	4,80	Q à Y	0%

Como há taxas elevadas de produção, o tempo da maior parte das tarefas excede o tempo de ciclo especificado. Assim, é exigido que mais de uma estação de trabalho ofereça capacidade de produção suficiente, precisando serem combinadas para formar um centro de trabalho, que possuem postos de trabalho paralelos, em que vários colaboradores executam um conjunto idêntico de tarefas. Cada colaborador corresponde a uma estação de trabalho.

A execução do balanceamento segue de acordo com a heurística de Utilização Incremental descrita na seção 2.1, desenvolvida na Figura 5, e exemplificada a seguir.

Inicia-se o balanceamento atribuindo, em ordem de precedência, uma tarefa a um centro de trabalho. A tarefa A, que possui um TP de 4,74 s/produto (Tabela 2), e um TC de 4,30 s/produto (Tabela 3) é, então, adicionada ao centro de trabalho 1. Esses valores indicam que é necessário 1,10 estações de trabalho em A para conseguir produzir toda a demanda. Frente a impossibilidade de se contratar 1,10 colaboradores, o número real necessário de estações de trabalho passa a ser 2, com utilização de 55,1% do centro. Como a utilização não chegou a 100%, a próxima tarefa, B, é então adicionada a esse centro de trabalho, e os TP's das duas tarefas (A e B) são somados e divididos pelo TC correspondente, encontrando assim um número real de 3 estações, com utilização de 98,5%. Mesmo com uma utilização alta, ainda é acrescentada uma nova tarefa ao centro de trabalho 1, com o intuito de aumentá-la ainda mais. A tarefa C é, então, adicionada, mas a utilização cai para 88,8%. Sendo assim, farão parte do centro de trabalho 1 apenas as tarefas A e B, com uma utilização de 98,5% e 3 estações de trabalho, ou seja, três colaboradores serão responsáveis pela

execução dessas duas tarefas. A tarefa C, é, em seguida, alocada a um novo centro de trabalho. Esse procedimento é repetido para as tarefas restantes, até que a última tarefa seja alocada.

Centro de Trabalho	Tarefa	Tempo Padrão (s/produto)	Número de estações de trabalho necessário	Número real de estações de trabalho necessário	Utilização
1	A	4,74	1,10	2,00	55,1%
1	A;B	12,72	2,95	3,00	98,5%
2	C	10,22	2,37	3,00	79,1%
2	C;D	15,75	3,66	4,00	91,4%
2	C;D;E	21,59	4,95	5,00	99,1%
3	F	5,59	1,24	2,00	62,0%
3	F;G	17,12	3,80	4,00	95,0%
4	H	6,55	1,45	2,00	72,6%
4	H;I	14,46	3,21	4,00	80,2%
4	H;I;J	20,41	4,53	5,00	90,5%
5	K	3,14	0,70	1,00	69,6%
5	K;L	13,88	3,08	4,00	77,0%
5	K;L;M	26,90	5,83	6,00	97,2%
6	N	3,57	0,75	1,00	75,4%
7	O	6,25	1,32	2,00	66,1%
7	O;P	12,08	2,56	3,00	85,2%
7	O;P;Q	18,29	3,87	4,00	96,7%
8	R	2,96	0,62	1,00	61,7%
9	S	2,33	0,49	1,00	48,6%
9	S;T	5,99	1,25	2,00	62,4%
9	S;T;U	12,34	2,57	3,00	85,7%
9	S;T;U;V	19,05	3,97	4,00	99,2%
10	W	3,05	0,63	1,00	63,5%
10	W;X	7,82	1,63	2,00	81,5%
10	W;X;Y	14,29	2,98	3,00	99,3%
TOTAL DE ESTAÇÕES NECESSÁRIAS				36,00	

Figura 5 – Aplicação do método heurístico de Utilização Incremental

Os resultados para o estado da linha de produção depois do equilíbrio podem ser observados na Figura 5, onde os retângulos vermelhos indicam os centros de trabalho formados e as tarefas que lhes pertence, como também o número real de estações de trabalho (colaboradores) necessário para cada um dos centros, que diminuiu em cinco, comparado com os 41 colaboradores que eram necessários no cenário anterior.

Pela equação (4) é possível obter o valor da utilização da linha, que é de 94%.

4.2. Modelo de simulação da linha de produção balanceada

Depois de terminar o balanceamento da linha de produção, todas as informações e melhorias recém-adquiridas devem ser utilizadas para a criação e validação do modelo conceitual, que pode ser observado na Figura 6, sendo depois implementado no Arena®. O novo modelo é agora chamado de modelo de simulação da linha de produção balanceada.

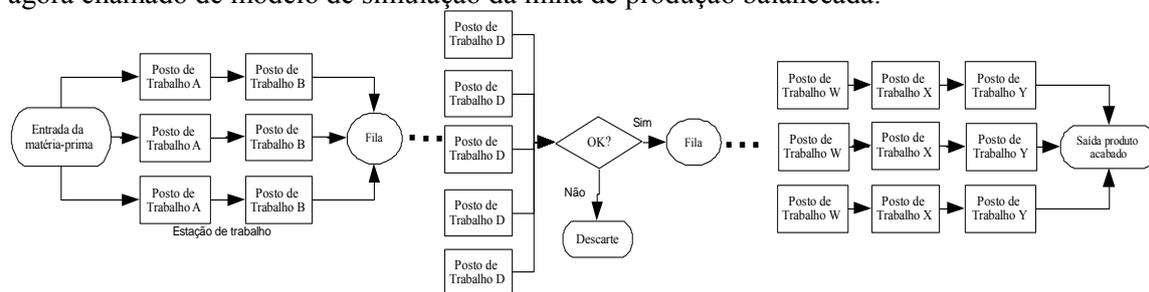


Figura 6 – Modelo conceitual da linha balanceada

Depois de verificado, foi realizado o experimento, também com uma corrida de simulação para cinco dias com quatro dias de tempo de *warm-up* e 100 replicações, obtendo a média para um dia de trabalho. Os resultados mostraram que o modelo balanceado é mais eficaz, sendo observado um menor tempo ocioso e menores estoques intermediários entre os postos (Figura 7), com uma produção média diária de 6000 produtos acabados e cinco colaboradores a menos.

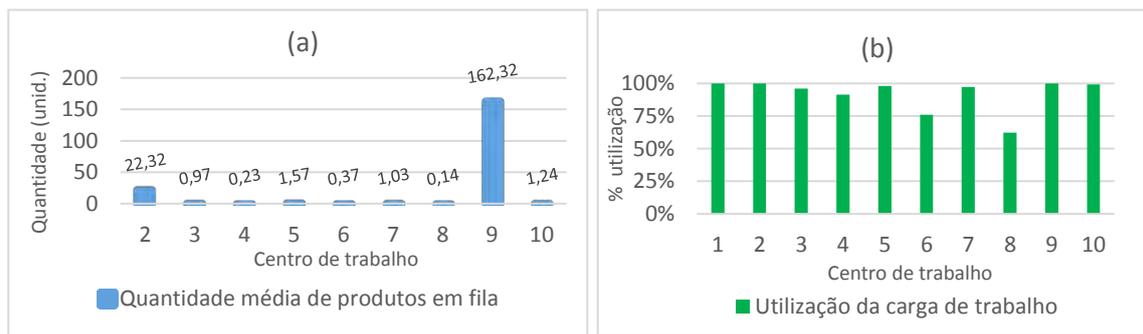


Figura 7 – (a) Quantidade média de produtos em fila da linha balanceada e (b) Utilização da carga de trabalho da linha balanceada

Apesar de todas as melhorias, além de satisfazer o objetivo da linha, que é o de atingir a meta diária e reduzir custos, pode-se observar que o centro de trabalho 9 possui fila muito maior que os outros centros, e que o colaborador do centro 8 está com carga de trabalho muito inferior aos outros, não estando em equilíbrio. O centro de trabalho 1 possui utilização de 100%, mas isso acontece porque os 7000 produtos chegam de uma única vez para serem fabricados, e como o cálculo do balanceamento é feito para demanda de 6000, ele não possui tempo ocioso, produzindo o máximo possível. Pelo mesmo motivo do modelo de simulação não balanceado, o estoque em fila do posto 1 não é contabilizado.

4.3. Resultado final do modelo de simulação

Sendo possível obter rapidamente as variáveis de saída através da simulação, realizam-se mudanças no cenário balanceado para melhorar ainda mais a linha. Ao englobar os centros de trabalho 8 e 9 em um só centro, percebeu-se uma melhoria significativa na linha de produção, que reduziu drasticamente os estoques do centro 9 para uma média de 0,27 produtos na fila, Figura 8(a). Em contrapartida, o centro de trabalho 10 aumentou seu estoque, mas para um número inferior ao cenário anterior. A utilização dos colaboradores também melhorou, Figura 8(b), e a quantidade produzida aumentou de 6000 para 6037, utilizando o mesmo número de colaboradores.

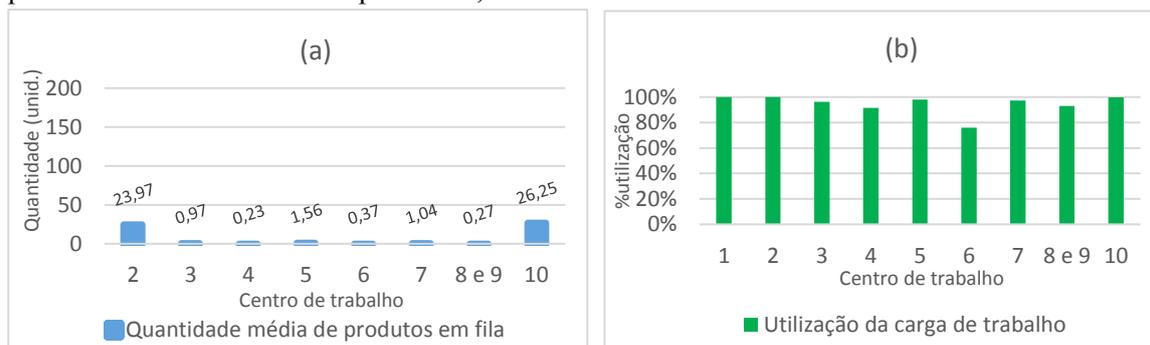


Figura 8 – (a) Quantidade média em fila da linha balanceada com melhorias e (b) Utilização da carga de trabalho da linha balanceada com melhorias

5. Análise e comparação do modelo balanceado e não balanceado

Ao incluir todas as melhorias do sistema de produção no modelo de simulação, os resultados do novo cenário são apresentados na Tabela 4 e Figura 9. Com essas melhorias, a média do número de produtos fabricados cresceu de 5819 para 6037, enquanto que as linhas de produção operam agora com um estoque intermediário mais balanceado e com um número inferior de colaboradores. É evidente que após o balanceamento e simulação, existe uma porcentagem menor de ociosidade, minimizando custo com mão de obra e atendendo a todos os pedidos em dia.

Tabela 4 – Comparação da quantidade produzida e número de colaboradores entre os cenários

	Quantidade produzida	Número de colaboradores
Cenário não-balanceado	5819	41
Cenário balanceado	6000	36
Cenário balanceado com melhorias	6037	36

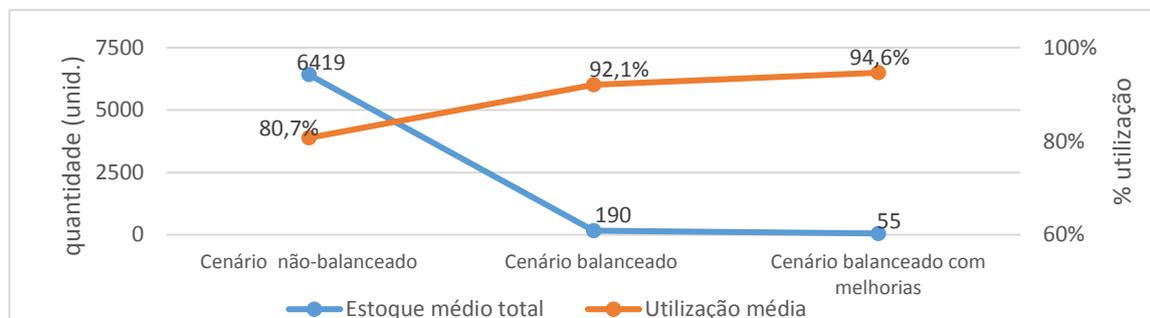


Figura 9 – Comparação dos cenários para a média total de estoque intermediário e %utilização

6. Conclusão

Neste trabalho, uma aplicação do processo de uma produção real é apresentado, oferecendo, inicialmente, uma baixa produtividade e altos níveis de estoque e ociosidade. Com o auxílio do modelo de combinação do balanceamento de linha e do método de simulação de eventos discretos, há uma melhoria significativa na eficiência, e consequentemente na produtividade da linha. Os produtos acabados aumentaram de 5819 para 6037 ao dia, a média total de produtos em fila diminuiu de 6419 para 55, e a média de utilização aumentou de 80,7% para 94,6%. A necessidade de colaboradores, que antes era de 41, diminuiu para 36. Assim sendo, foi comprovada a melhoria do sistema em todos os quatro indicadores acima medidos.

Com os resultados encontrados na simulação da linha balanceada, foi possível comprovar que o uso do balanceamento de linhas de produção é uma ferramenta eficaz para o processo, mas que mesmo gerando bons resultados, o uso da simulação combinado a esse método pode trazer melhores soluções. Assim sendo, foi utilizada a simulação para criar outros cenários, sendo possível ver imediatamente o efeito de certos parâmetros sobre a execução do processo, introduzindo melhorias na linha já balanceada e evitando custos desnecessários.

Em resumo, os resultados deste trabalho de pesquisa mostram que o método do balanceamento de linha com a combinação do modelo de simulação de eventos discretos é extremamente útil e eficiente para a melhoria do processo da linha de produção e aumento da sua produtividade.

Para um trabalho futuro, o balanceamento e a simulação poderiam ser combinados para analisar outros cenários, como, por exemplo, assumindo demanda estocástica. Este estudo adicionaria outras possibilidades de análise, visto que a mesma trabalha com variações de demanda ao longo do ano.

Referências

- Becker, C. e Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3):694-715.
- Borshchev, A. e Filippov, A. (2004). From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. In *Proceedings of the 22nd international conference of the system dynamics society*, Oxford.
- Boysen, N., Fliedner, M. e Scholl, A. (2008). Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*, 111(2):509-528.

Bukchin, J. e Rubinovitz, J. (2003), A weighted approach for assembly line design with station paralleling and equipment selection. *IIE transactions*, 35(1):73-85.

Chwif, L. e Medina, A.C. (2006). Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e prática. Dos autores, São Paulo.

Das, B., Garcia-Diaz, A., MacDonald, C. A. e Ghoshal, K. K. (2012). Evaluation of alternative assembly line arrangements with stochastic operation times: A computer simulation approach. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 23(6):806-822.

Gaither, N. e Frazier, G. (2002). Administração da produção e operações. Pioneira Thomson Learning, São Paulo.

Grzechca, W. (2011). Final results of assembly line balancing problem. *INTECH Open Access Publisher*, 1-11.

McMullen, P. R. e Frazier, G. V. (1997). A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations. *International Journal of Production Economics*, 51(3):177-190.

Mendes, A. R., Ramos, A. L., Simaria, A. S. e Vilarinho, P. M. (2005). Combining heuristic procedures and simulation models for balancing a PC camera assembly line. *Computers & Industrial Engineering*, 49(3):413-431.

Moreira, D. A. (2012). Administração da produção e operações. Cengage Learning, São Paulo.

Negahban, A. e Smith, J. S. (2014). Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(2):241-261.

Pfeil, G., Holcomb, R., Muir, C. T., e Taj, S. (2000). Visteon's Sterling plant uses simulation-based decision support in training, operations, and planning. *Interfaces*, 30(1):115-133.

Pita, J. F. e Wang, Q. (2010). A simulation approach to facilitate manufacturing system design. *Int. J. Simul. Model*, 9(3):152-164.

Sakurada, N., e Miyake, D. I. (2009). Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. *Gestão & Produção*, 16(1):25-43.

Slack, N., Chambers, S. e Johnston, R. (2009). Administração da produção. Atlas, São Paulo.

Souza, R., e Ying, Z. Z. (1999). Intelligent control paradigm for dynamic discrete event system simulation. *Discrete Event Dynamic Systems*, 9(1):65-73.

Spedding, T. A. e Sun, G. Q. (1999). Application of discrete event simulation to the activity based costing of manufacturing systems. *International journal of production economics*, 58(3): 289-301.

Vieira, L. H. S. (2009). Balanceamento de uma linha de montagem na Adira S.A. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Industrial e Gestão). FEUP, Portugal.

Zupan, H; Herakovic, N. (2015). Production line balancing with discrete event simulation: A case study, *IFAC-PapersOnLine*, 48(3):2305-2311.