



CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRANSIENTE EM LINHAS DE PRODUÇÃO USANDO SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

Julio A. Godofredo, Ricardo Lüders, Leandro Magatão
CPGEI/UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Av. Sete de Setembro 3165, 80230-901, Curitiba-PR, Brasil
julio.a.godofredo@gmail.com,luders@utfpr.edu.br,magatao@utfpr.edu.br,

RESUMO

O comportamento transiente de linhas de produção é particularmente relevante em linhas de modelo misto, pois tanto o balanceamento quanto o sequenciamento da linha são fortemente influenciados pelo mix de produção. Este trabalho considera a simulação de uma linha de produção de carrocerias de automóveis cujo balanceamento e sequenciamento foram obtidos em trabalhos anteriores a partir de modelos de otimização em Programação Linear Inteira Mista (PLIM), que capturam apenas o comportamento em regime permanente. Porém, o foco deste artigo está no regime transiente, quando o sequenciamento de entrada é alterado ou características estruturais da linha são modificadas. Além disso, são propostos um conjunto de novos indicadores que permitem caracterizar adequadamente o desempenho transiente da linha. Este indicadores são utilizados para avaliar os resultados obtidos de experimentos que alteram elementos específicos da linha, como o tempo de transporte entre as estações de trabalho e a presença/ausência de *buffers*. Estes resultados enfatizam a importância da integração de respostas de simulação e de regime permanente obtidas por modelos PLIM.

PALAVRAS CHAVE. Manufatura. Balanceamento de linha de produção. Sequenciamento. Simulação de eventos discretos. Análise transiente.

Tópicos. SIM – Simulação, IND – PO na Indústria

ABSTRACT

The transient behavior of assembly lines is particularly relevant in mixed model lines, as both line balancing and sequencing are strongly influenced by the production mix. This work considers a car body production simulation whose line balancing and sequencing were obtained from previous works using Mixed Integer Linear Programming (MILP), which only captures the steady state behavior. However, the focus of this paper is on the transient behavior generated by changing the input mix or structural properties of the line. In addition, a set of new indicators are proposed to adequately characterize the transient performance of the line. These indicators are used to evaluate the results of experiments that change specific elements of the line, such as time delay between workstations and set of buffers. These results emphasize the importance to consider both simulation and steady state responses usually obtained by MILP models.

KEYWORDS. Manufacturing. Assembly line balancing. Sequencing. Discrete event simulation. Transient analysis.

Paper topics. SIM – Simulation, IND – OR in Industry



1. Introdução

Modelos matemáticos de otimização, tais como modelos PLIM, para o balanceamento e sequenciamento de linhas de produção são amplamente utilizados para aumentar a produtividade. Entretanto, os resultados obtidos neste tipo de modelagem são válidos para as linhas operando em regime permanente [Lopes et al., 2016]. Não é comum uma representação do regime transiente das linhas de produção. Neste trabalho, assume-se que uma linha opera em regime transiente quando o comportamento de saída das unidades da linha não se repete de forma regular. A partir do momento que o padrão de saída das unidades estabelece um padrão cíclico, diz-se que a linha opera em regime permanente.

O regime transiente pode ser analisado por simulação. Na literatura, diversos trabalhos analisam linhas de produção através de simulação. No trabalho de Negahban e Smith [2014], os autores fornecem uma revisão abrangente das publicações no assunto entre 2002 e 2013. A revisão sobre análise de “throughput” desenvolvida por Li et al. [2009] evidencia que a maioria dos trabalhos da literatura focam no estado estacionário de sistemas produtivos e que a análise de transiente em linhas é praticamente inexplorada. De modo complementar, os autores afirmam que a análise transiente é importante pelo fato de estar diretamente relacionada a, por exemplo, perdas produtivas durante transições e controle de estoques em processo. Li et al. [2009] afirmam que a análise de transiente em linhas é uma área em aberto com muitos potenciais de pesquisa.

Este trabalho considera uma linha de produção de modelo misto da indústria automotiva, a qual produz carrocerias de automóveis. Em um estudo realizado por [Meira, 2015], modelos PLIM são utilizados para a obtenção de configurações de balanceamento e sequenciamento otimizadas para esta linha. As respostas destes modelos são função das características da linha e de dados determinísticos dos tempos em que as tarefas são executadas e representam o resultado da linha operando em regime permanente. Neste artigo, a análise desta linha é estendida usando simulação de eventos discretos, onde são respondidas questões do tipo: “o que ocorre se um *buffer* for removido?”, ou “o que ocorre se houver alteração no sequenciamento de entrada dos modelos na linha?”. O comportamento transiente é caracterizado tanto no início da operação (quando as estações de trabalho encontram-se vazias), quanto na mudança de sequenciamento.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta conceitos fundamentais sobre linhas de produção. A Seção 3 descreve a linha de carrocerias de automóveis estudada e a Seção 4 o respectivo modelo de simulação desenvolvido. A Seção 5 apresenta os indicadores de desempenho utilizados para avaliar os resultados e propõe elementos para caracterizar adequadamente o regime transiente. A Seção 6 apresenta e analisa os resultados de simulação obtidos, finalizando com as conclusões na Seção 7.

2. Conceitos básicos

Uma linha de produção é formada por uma sequência de estações dispostas em linha por onde passam unidades que sofrem a ação de atividades em cada estação, transformando esta unidade até a obtenção do produto final na última estação. O tempo entre as saídas de cada unidade no final de uma linha de produção é denominado tempo de ciclo [Gaither e Frazier, 2002]. O tempo de ciclo é determinado pela estação de trabalho que possui a maior soma dos tempos das tarefas alocadas e, portanto, representa o gargalo da produção, pois limita o tempo de ciclo.

Como descreve [Boysen et al., 2007], nos sistemas modernos de produção acaba sendo comum encontrar diferentes modelos de um mesmo produto dividindo a mesma linha de produção. Em geral, pode-se distinguir duas formas diferentes de organização. A primeira, denominada linha de modelo misto, produz de forma “embaralhada” unidades de diferentes modelos. A segunda, denominada linha multimodelo produz uma sequência de lotes que contêm unidades de um único modelo ou grupo de modelos similares.



Boysen et al. [2007] classificam as linhas diferenciando-as em relação ao controle da movimentação entre estações: em compasso e descompassadas. Nas linhas em compasso, as unidades são movimentadas ao mesmo tempo em todas as estações. Isso restringe a quantidade de trabalho das estações, visto que o tempo de ciclo é influenciado pela velocidade de movimentação das unidades. Nas linhas descompassadas, as unidades são transferidas para o próximo posto assim que a operação finaliza, desde que o próximo posto esteja vazio. A linha de produção considerada neste artigo é uma linha descompassada de modelo misto.

Segundo [Ritzman e Krajewski, 2004], balanceamento de linha é a “atribuição de trabalhos a estações em uma linha de modo a obter melhores índices de produção e equilibrar os tempos de processamento de cada estação”. Os autores também citam que o processo de balanceamento normalmente é realizado durante a instalação da linha, quando é necessário alterar seu índice de produção horário ou quando há modificações dos produtos ou processo. Problemas de balanceamento de linhas vêm sendo estudados durante décadas, conforme trabalhos desenvolvidos por [Bowman, 1960], [Thomopoulos, 1967], [Dar-El e Rubinovitch, 1979], [Klein e Scholl, 1996], [Lapierre et al., 2004] e [Lopes et al., 2016].

Assim como modelos de otimização do balanceamento, os modelos de sequenciamento buscam otimizar indicadores produtivos tais como o tempo de ciclo. De acordo com Scholl [1999], “o balanceamento e o sequenciamento são problemas fortemente interdependentes”. E segundo [Baker, 1974], “enquanto o balanceamento da linha decide sobre a atribuição de tarefas às estações o sequenciamento determina a ordem de produção de um mix”. Pela própria definição, percebe-se que modelos de sequenciamento são aplicáveis em linhas de modelo misto. Um resumo do estado da arte sobre as principais técnicas para otimização do sequenciamento é descrito por [Solnon, 2005]. Em outras palavras, modelos de sequenciamento buscam determinar a melhor sequência de entrada das unidades na linha, atendendo uma demanda predefinida.

Dentre as variáveis de entrada, o mix a ser produzido dos modelos possui um impacto relevante nos resultados encontrados em modelos de sequenciamento. Esse valor pode ser reproduzido como valor total a ser fabricado num período ou representado em forma percentual. Por exemplo, para produção de três modelos, pode-se representar o mix de produção como [150 100 250] ou [30% 20% 50%].

Os resultados dos sequenciamentos são representados em lotes contendo a ordem dos modelos a serem produzidos. Como exemplo, para uma linha que produz quatro modelos de automóveis, denominados modelos A, B, C e D, com uma demanda de [10% 20% 30% 40%], pode-se ter como sequenciamento a seguinte configuração: [B D A C D D B D C C]. Neste caso o lote de sequenciamento possui 10 unidades, sendo que a primeira unidade que entra na linha é do modelo B, a segunda do modelo D e assim por diante, cumprindo a demanda exigida. Após a entrada da última unidade, o ciclo volta a se repetir.

3. Linha de Carroceria de Automóveis

A linha de carroceria de automóveis é descompassada, do tipo modelo misto e produz cinco modelos de carrocerias, denominados C, B, F, X e H. O mix de produção varia conforme a demanda, podendo assumir seis possíveis configurações, conforme a Tabela 1 [Meira, 2015]. Por exemplo, o mix 1 é formado por 3 unidades do modelo C, 1 do B, 5 do F e 5 do modelo H, totalizando 14 unidades a serem produzidas. Estas configurações de mix foram estabelecidas de forma a contemplar a produção aproximada de um período fixo de tempo. A linha possui dez estações de trabalho. Em todos os casos estudados, a linha é configurada de tal maneira que as estações com índice par são utilizadas como *buffer*.

O tempo de processamento de cada modelo em cada estação é dado pela solução do modelo de otimização em PLIM desenvolvido por Meira [2015], que fornece o melhor balanceamento de tarefas de acordo com o mix de produção dado. Estes tempos são mostrados na Tabela 11 do Apêndice.



Tabela 1: Mix de produção para a linha de carrocerias de automóveis [Meira, 2015]

Mix	C	B	F	X	H	Total
1	3	1	5	0	5	14
2	3	1	2	3	5	14
3	2	2	3	2	5	14
4	1	1	3	3	6	14
5	1	2	4	2	5	14
6	0	2	5	2	5	14

4. Modelo de Simulação

O modelo de simulação foi desenvolvido com o pacote Simio 7 [Fioroni, 2012], considerando as seguintes hipóteses:

1. Uma unidade somente deixa a estação de trabalho quando o processamento estiver finalizado e a estação seguinte vazia;
2. Uma unidade somente deixa um *buffer* quando a estação seguinte estiver vazia;
3. O tempo de transporte entre as estações é o mesmo;
4. Uma unidade inicia o processamento assim que entra na estação.
5. Uma unidade chega na primeira estação de trabalho após decorrido um tempo de transporte da saída da unidade anterior.

A representação visual do modelo de simulação no Simio é dada pela Fig. 1. A representação das unidades que circulam na linha é feita através de um tipo de entidade [Model_Car] que simula as unidades de todos os modelos. O processo de entrada das unidades na linha é representado através de um gerador de entidades, [Model_Input] na Figura 1, recurso destinado a entrada de todas as entidades no sistema. O tipo de entidade que entra no sistema e o seu tempo de entrada são configurados de acordo com os experimentos da Seção 6.

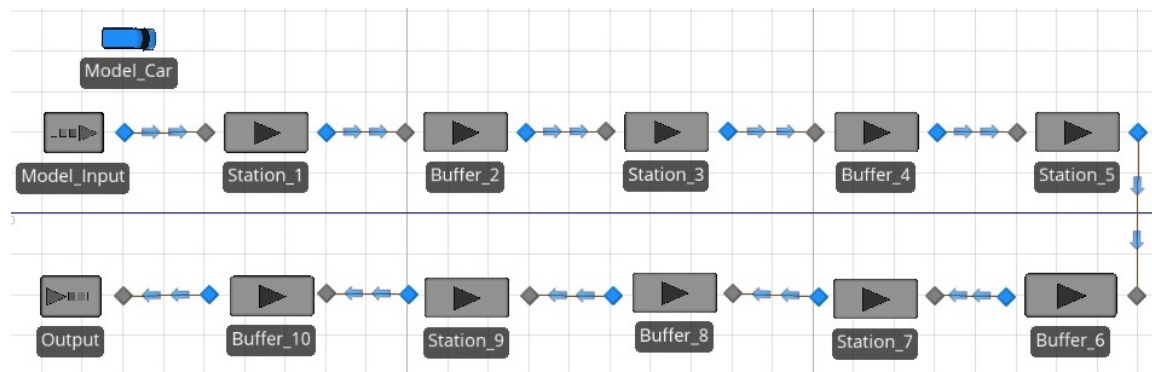


Figura 1: Representação visual bidimensional da linha de carrocerias de automóveis gerada através do SIMIO 7

De acordo com a Fig. 1, as estações de trabalho são representadas por cinco servidores [Station_1, Station_3, Station_5, Station_7, Station_9], simulando as estações 1, 3, 5, 7 e 9, respectivamente. Em cada servidor, os tempos de processamento das unidades são configurados conforme a Tabela 11 do Apêndice. De acordo com a Seção 3, as estações de índice par funcionam como *buffers*, representadas através de cinco servidores na Fig. 1 [Buffer_2, Buffer_4, Buffer_6, Buffer_8, Buffer_10], simulando as estações 2, 4, 6, 8 e 10, respectivamente. O tempo de processamento nos *buffers* é definido como zero. A saída das unidades da linha é representada pelo bloco [Output] na Fig. 1.



5. Indicadores de Desempenho

Conforme ilustrado na Fig. 2, dada uma linha de produção de modelo misto, a variável inteira n indica a posição que uma unidade ocupa na linha, partindo do início da produção. Em alguns casos, são analisados lotes de unidades. Um lote é representado pela posição n de sua última unidade e pelo seu tamanho, medido em número de unidades pela variável s . Para o exemplo da Fig. 2, $n = 11$ e $s = 7$. Os tempos de entrada e saída de uma unidade n da linha em relação ao início da produção são dados por $TE(n)$ e $TS(n)$, respectivamente.

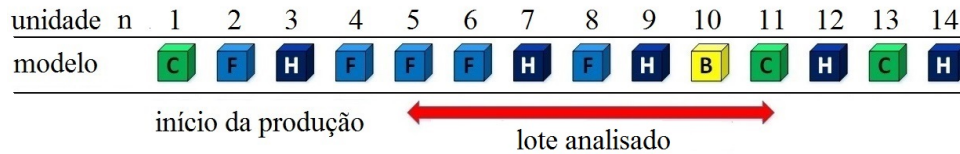


Figura 2: Representação visual das variáveis utilizadas

Esta seção descreve os indicadores de desempenho utilizados para avaliar os resultados de simulação. O tempo de ciclo TC é encontrado na literatura. Porém, para avaliar o desempenho em regime transiente, é proposto o tempo de ciclo médio do lote $TCML$ e o conjunto de transição CT .

Como apresentado por Gaither e Frazier [2002], o tempo de ciclo $TC(n)$ pode ser obtido a partir da diferença de tempo entre a saída da unidade $(n - 1)$ e n de acordo com (1).

$$TC(n) = TS(n) - TS(n - 1) \quad (1)$$

Em linhas de modelo único este valor é constante após a linha entrar em regime permanente. Para casos multimodelo ou modelo misto, flutuações podem ocorrer, mesmo em regime permanente, devido a diferenças nos tempos de produção entre os modelos.

Para identificar quando uma linha de produção entra em regime permanente, é definido o indicador tempo de ciclo médio do lote $TCML(n, s)$. Este indicador é a média móvel de TC das últimas s unidades, conforme (2).

$$TCML(n, s) = \frac{\sum_{i=1}^s TC(n - i + 1)}{s} \quad (2)$$

Quando $TCML$ é constante, o padrão de saída dos lotes se repete indefinidamente, e a linha atingiu o regime permanente. Este padrão é válido em linhas de modelo único, multimodelo e modelo misto. No contexto de balanceamento de linhas de produção, este indicador é minimizado em problemas MALBP-2 (*Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem, Type 2*), como os apresentados por Becker e Scholl [2004].

Devido a fatores de mercado, uma situação usual dentro da indústria é a mudança de demanda de produção das linhas de montagem [Scholl, 1999]. Em consequência, é comum a alteração de sequenciamentos durante a produção. Uma forma conveniente de representar os efeitos transientes nas linhas de produção é por meio de um gráfico de $TC(n)$ e $TCML(n, s)$, conforme proposto na Fig. 3. Os valores de $TC(n)$ são dados pela curva em vermelho e a curva em verde fornece os valores de $TCML(n, s)$ calculados sobre as últimas s unidades (tamanho do lote).

Quando ocorre mudança de sequenciamento da linha, o transiente inicia na última unidade ui do lote inicial e termina na primeira unidade uf do lote final, após o estabelecimento do regime permanente (detectado quando $TCML(n, s)$ volta a se tornar constante). Neste trabalho, define-se um conjunto de transição $CT = \{tt, dp, max, min, \mu, \rho\}$ para caracterizar o transiente, cujos parâmetros são descritos na Tabela 2.

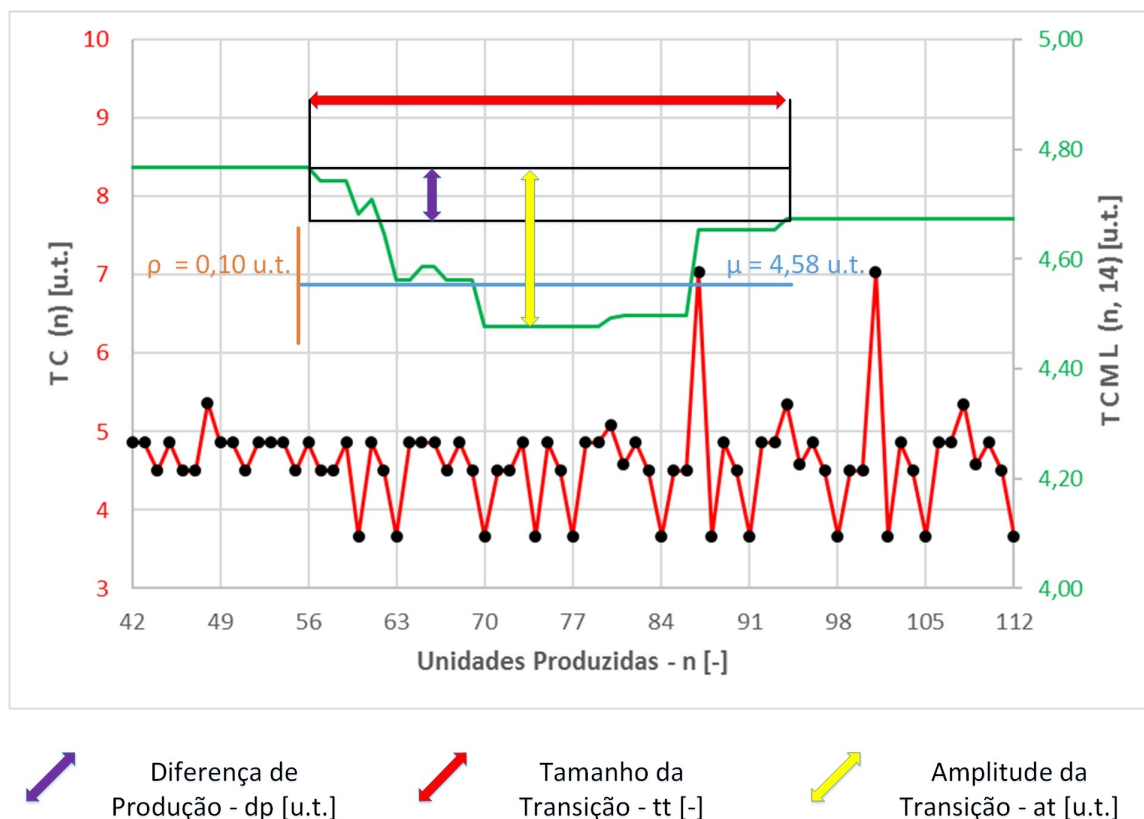


Figura 3: Parâmetros do conjunto de transição CT no gráfico de transição.

Tabela 2: Elementos do Conjunto de Transição (CT).

Parâmetro	Descrição
tt	tamanho da transição
dp	diferença de produção entre regimes
max	valor máximo do $TCML$ na transição
min	valor mínimo do $TCML$ na transição
μ	média do $TCML$ na transição
ρ	desvio padrão do $TCML$ na transição

O tamanho da transição $tt = uf - ui + 1$ é um valor inteiro que representa o número de unidades produzidas durante o transiente. A diferença de produção $dp = TCML(uf, s) - TCML(ui, s)$ é dada pela diferença entre os $TCMLs$ de regime inicial e final. Os parâmetros max e min são dados pelos valores máximo e mínimo, respectivamente, do $TCML(n, s)$ para $n = ui, \dots, uf$, ou seja, durante o transiente. A partir destes parâmetros, calcula-se a amplitude de transição $at = max - min$. Os parâmetros μ e ρ são a média e o desvio padrão, respectivamente, do $TCML(n, s)$ durante o transiente. Para o exemplo ilustrativo da Fig. 3, tem-se $ui = 56$, $uf = 94$, $TCML(56, 14) = 4,77$ u.t. e $TCML(94, 14) = 4,67$ u.t. O conjunto CT é mostrado na Tabela 3, sendo que os valores de tt , dp , μ , ρ e at estão marcados em vermelho, roxo, azul, laranja e amarelo na Fig. 3, respectivamente.

Tabela 3: Conjunto CT para o exemplo da Fig. 3.

tt [-]	dp [u.t.]	max [u.t.]	min [u.t.]	μ [u.t.]	ρ [u.t.]
39	-0,10	4,77	4,48	4,58	0,10



6. Resultados

Os experimentos para linha de carrocerias de automóveis possuem as mesmas configurações de balanceamento e sequenciamento usadas em testes feitos por Meira [2015]. Estes testes foram realizados em duas fases. Na primeira fase, um modelo de otimização em PLIM é usado para balancear a linha para um determinado mix de produção, dentre os seis possíveis da Tabela 1. Na segunda fase, o sequenciamento é definido por outro modelo em PLIM que usa ou não o mesmo mix do balanceamento. Isso foi feito para avaliar a sensibilidade do balanceamento quando se usa um mix diferente para o sequenciamento.

Na Tabela 4, a coluna **bal. mix** indica o mix usado para o balanceamento (primeira fase) e a coluna **seq. mix** indica o mix do sequenciamento (segunda fase). A última coluna indica o valor do tempo do lote em regime permanente em u.t. obtido em regime permanente. Note que o melhor resultado é obtido quando balanceamento e sequenciamento são obtidos para o mesmo mix.

Tabela 4: Configurações dos experimentos para linha de carrocerias de automóveis [Meira, 2015]

Teste	Sequenciamento														bal. mix	seq. mix	Tempo do lote [u.t.]
#33	F	H	F	H	H	F	C	F	H	C	F	C	H	B	1	1	66,75
#62	H	H	B	C	H	C	X	F	F	H	H	F	B	X	1	3	65,32
#54	H	H	B	X	C	H	X	F	C	F	H	C	H	X	2	2	65,42

Utilizando as configurações de balanceamento e sequenciamento dos testes da Tabela 4, foram realizados dois tipos de experimentos: i) análise da influência do tempo de transporte entre as estações; ii) análise da influência dos *buffers*.

6.1. Influência do tempo de transporte

Nesta seção é analisado como o tempo de transporte das unidades entre as estações influencia o regime transiente quando ocorre mudança no sequenciamento durante a operação da linha. Para tanto, foram realizados cinco experimentos (tr1 a tr5) nos quais os tempos de transporte entre as estações são alterados na simulação, conforme a Tabela 5. O transiente é analisado quando o sequenciamento #33 é alterado para #62. Estes testes foram selecionados pois ambos utilizam o mesmo mix 1 para o balanceamento. Assim, parte-se da condição ideal do mesmo mix 1 para balanceamento e sequenciamento, e altera-se a entrada da linha para o mix 3. Em todos os experimentos, o primeiro sequenciamento é utilizado até a unidade $n = 56$.

Tabela 5: Tempos de transporte entre as estações para os experimentos tr1 a tr5.

Experimento	Tempo de transporte entre as estações (i,j) [u.t.]								
	(1,2)	(2,3)	(3,4)	(4,5)	(5,6)	(6,7)	(7,8)	(8,9)	(9,10)
tr1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tr2	15	15	15	15	15	15	15	15	15
tr3	30	30	30	30	30	30	30	30	30
tr4	15	15	15	15	60	15	15	15	15
tr5	15	15	15	15	120	15	15	15	15

Primeiramente, são comparados os experimentos tr1, tr2 e tr3, nos quais o tempo de transporte entre as estações é 0, 15 e 30 u.t., respectivamente. O conjunto CT para estes casos é mostrado na Tabela 6. Em todos os experimentos, o segundo sequenciamento entra em regime permanente na unidade $n = 87$. Portanto, em todos os casos $tt = 32$ unidades. Percebe-se que o aumento em valor absoluto do tempo de transporte entre todas as estações apenas aumenta a diferença temporal entre os eventos. No conjunto CT , apenas max , min e μ aumentam proporcionalmente devido ao aumento do tempo de transporte.



Tabela 6: Conjunto CT para os experimentos tr1, tr2 e tr3.

Experimento	tt [-]	dp [u.t.]	max [u.t.]	min [u.t.]	μ [u.t.]	ρ [u.t.]
tr1	32	-0,102	4,518	4,311	4,392	0,066
tr2	32	-0,102	4,768	4,561	4,642	0,066
tr3	32	-0,102	5,018	4,811	4,892	0,066

Em seguida, são comparados os experimentos tr2, tr4 e tr5, os quais possuem diferenças no tempo de transporte somente entre as estações 5 e 6, iguais a 15, 60 e 120 u.t., respectivamente. Neste caso, observa-se um gargalo produtivo entre as estações 5 e 6. O conjunto CT é mostrado na Tabela 7 e o gráfico de transição na Figura 4. De acordo com a Tabela 7, o valor de tt se reduz com o aumento do tempo de transporte entre as estações 5 e 6, ou seja, o período transiente torna-se mais curto, conforme pode ser visto também na Figura 4. Dessa forma, embora o aumento do tempo de transporte acentue o efeito do gargalo produtivo entre as estações 5 e 6, o período transiente é favorecido (reduzido).

Tabela 7: Conjunto CT para os experimentos tr2, tr4 e tr5.

Experimento	tt [-]	dp [u.t.]	max [u.t.]	min [u.t.]	μ [u.t.]	ρ [u.t.]
tr2	32	-0,102	4,768	4,561	4,642	0,066
tr4	27	-0,152	4,829	4,606	4,690	0,065
tr5	16	-0,132	5,056	4,864	4,960	0,055

6.2. Influência dos *buffers*

Para analisar a influência dos *buffers* no regime transiente foram realizados oito experimentos (b0 a b7), apresentados na Tabela 8, nos quais *buffers* são removidos da linha. O transiente é analisado através da transição entre os os sequenciamentos dos testes #33 e #54. Em todos os experimentos, o primeiro sequenciamento ocorre até a unidade $n = 56$.

A Tabela 8 mostra a existência (1) ou não (0) do *buffer* na estação correspondente, sendo que a configuração de *buffers* do experimento b0 é a mesma utilizada em Meira [2015] para a otimização do balanceamento e sequenciamento da linha. O *buffer* 10 não sofre alteração, pois não interfere no desempenho da linha. Nos experimentos b1, b2 e b3 os *buffers* vão sendo retirados do início para o final da linha e nos experimentos b5, b6 e b7 ocorre o contrário.

Tabela 8: Configuração de *buffers* para os experimentos.

Experimento	<i>Buffer</i> 2	<i>Buffer</i> 4	<i>Buffer</i> 6	<i>Buffer</i> 8
b0	1	1	1	1
b1	0	1	1	1
b2	0	0	1	1
b3	0	0	0	1
b4	0	0	0	0
b5	1	1	1	0
b6	1	1	0	0
b7	1	0	0	0

A Tabela 9 mostra o conjunto CT para os experimentos b0 a b7. Nota-se uma significativa diminuição de $tt = 39$ para 18 e 16 quando os *buffers* são removidos. Isso pode ser explicado pelo efeito de armazenagem que os *buffers* proporcionam, acomodando melhor o transiente. Além disso, a remoção de um único *buffer* no início da linha já é suficiente para reduzir tt para o valor 18 obtido sem *buffers* (veja b4). Os outros parâmetros seguem uma tendência de aumento em valor absoluto com a retirada de *buffers*.

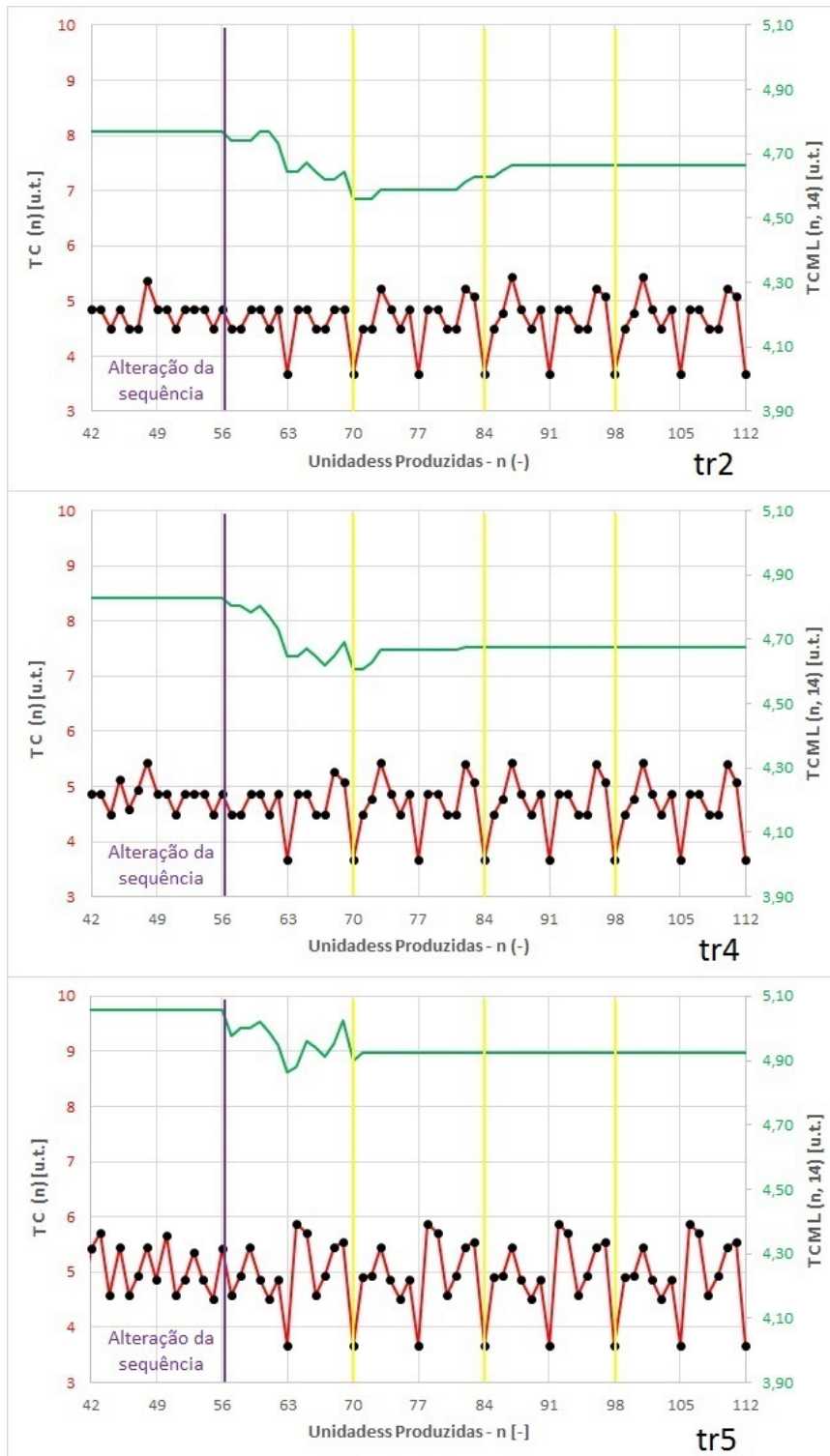


Figura 4: Gráfico de transição para os experimentos tr2, tr4 e tr5



Tabela 9: Conjunto CT para os experimentos b0 a b7.

Experimento	tt [-]	dp [u.t.]	max [u.t.]	min [u.t.]	μ [u.t.]	ρ [u.t.]
b0	39	-0,095	4,768	4,476	4,577	0,096
b1	18	-0,167	5,144	4,781	5,001	0,106
b2	18	-0,199	5,445	4,972	5,234	0,139
b3	18	-0,304	5,571	5,036	5,330	0,166
b4	18	-0,304	5,571	5,048	5,339	0,152
b5	16	-0,184	4,957	4,689	4,843	0,077
b6	16	-0,337	5,317	4,895	5,130	0,116
b7	16	-0,439	5,571	5,048	5,357	0,151

A Tabela 10 mostra os valores de $TCML$ em regime permanente antes e depois do transiente para os experimentos b0 a b7. A terceira e quinta colunas mostram a diferença relativa para o $TCML$ de b0 (antes e depois). À medida que os *buffers* são retirados, os valores de $TCML$ aumentam, tanto antes quanto depois do transiente. Além disso, a eliminação de *buffers* no início da linha tem um impacto maior no aumento do $TCML$ do que no final da linha, sendo mais relevante antes do transiente (em torno de 17%) do que depois (em torno de 13%). Isso significa que o sequenciamento inicial #33 é mais sensível à retirada de *buffers* do que o final #54.

Tabela 10: $TCML$ antes e depois do transiente para os experimentos b0 a b7.

Experimento	$TCML$ antes [u.t.]	Dif. [%]	$TCML$ depois [u.t.]	Dif. [%]
b0	4,768	0,00%	4,673	0,00%
b1	5,121	7,42%	4,954	6,02%
b2	5,445	14,20%	5,246	12,27%
b3	5,571	16,85%	5,268	12,73%
b4	5,571	16,85%	5,268	12,73%
b5	4,957	3,97%	4,774	2,16%
b6	5,317	11,52%	4,980	6,57%
b7	5,571	16,85%	5,133	9,84%

7. Conclusão

Uma linha de produção de modelo misto de carrocerias de automóveis foi simulada, tendo sido obtidos padrões de comportamento transiente quando se altera o sequenciamento da produção. Tanto o balanceamento quanto o sequenciamento da linha foram obtidos pela solução de modelos de otimização em PLIM de trabalhos anteriores. Entretanto, estes modelos não capturam o comportamento transiente. Os resultados mostram que o aumento do tempo de transporte, quando realizado em parte das estações de trabalho, pode aumentar significativamente a duração do período transiente, mesmo que o comportamento em regime antes e depois do transiente não sofra grandes alterações. Este comportamento também é observado com a inclusão/remoção de *buffers*. Porém, o regime permanente também pode ser significativamente alterado, ou seja, determinados sequenciamentos são mais sensíveis ao número de *buffers* do que outros. Isso motiva a investigação futura de modelos de otimização que levem em conta restrições sobre o comportamento transiente.

Agradecimentos

À CAPES pelo apoio financeiro para viabilização da pesquisa.



References

- Baker, K. R. (1974). *Introduction to sequencing and scheduling*. Wiley, New York.
- Becker, C. e Scholl, A. (2004). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(1):694–715.
- Bowman, E. (1960). Assembly-line balancing by linear programming. *Operational Research*, 8:2016–2032.
- Boysen, N., Fliedner, M., e Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(2):674–693.
- Dar-El, E. e Rubinovitch, Y. (1979). MUST - A multiple solutions technique for balancing single model assembly lines. *Management Science*, 25:1105–1114.
- Fioroni, M. M. (2012). *Modelagem e Simulação com o SIMIO*. SIMIO LCC, São Paulo.
- Gaither, N. e Frazier, G. (2002). *Administração da produção e operações*. Thomson Learning, Rio de Janeiro.
- Klein, R. e Scholl, A. (1996). Maximizing the production rate in simple assembly line balancing - A branch and bound procedure. *European Journal of Operational Research*, 91:367–385.
- Lapierre, S. D., Ruiz, A. B., e Soriano, P. (2004). Balancing assembly lines: An industrial case study. *Journal of Operational Research Society*, 168:589–597.
- Li, J., Blumenfeld, D. E., Huang, N., e Alden, J. M. (2009). Throughput analysis of production systems: recent advances and future topics. *International Journal of Production Research*, 47(14):3823—3851.
- Lopes, T. C., Sikora, C. G. S., e Magatão, L. (2016). Buffer and Cyclical Product Sequence Aware Assembly Line Balancing Problem: Model and Steady-State Balancing Case Study. In *Annals of the XLVIII SBPO*, p. 3458–3469.
- Meira, M. S. (2015). Otimização de produção de uma linha de montagem mista na indústria automotiva por meio de programação matemática. *Dissertação de mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná*.
- Negahban, A. e Smith, J. S. (2014). Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, (33):246–261.
- Ritzman, L. P. e Krajewski, L. J. (2004). *Administração da produção e operações*. Pearson Education, São Paulo.
- Scholl, A. (1999). *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*. Physica, Heidelberg, second edition.
- Solnon, C. (2005). The car sequencing problem: overview of state-of-the-art methods and industrial case. In *ROADEF*.
- Thomopoulos, N. T. (1967). Line Balancing-Sequencing for Mixed-Model Assembly. *Management Science*, 14(2):59–75.



Apêndice

Tabela 11: Resultado do balanceamento para a linha de carrocerias de automóveis para seis diferentes mix de produção [Meira, 2015]

Tempo de processamento [u.t] - mix 1					
Modelo	Estação 1	Estação 3	Estação 5	Estação 7	Estação 9
C	4,65	4,73	4,73	3,36	4,61
B	4,33	5,45	5,46	4,83	4,61
F	3,38	5,45	5,46	4,83	4,61
X	3,16	2,34	2,03	3,18	3,42
H	5,48	3,08	3,26	4,69	4,25
Tempo de processamento [u.t] - mix 2					
Modelo	Estação 1	Estação 3	Estação 5	Estação 7	Estação 9
C	3,81	5,63	3,87	3,38	4,61
B	3,49	6,37	5,88	4,88	4,61
F	2,54	6,37	5,78	4,88	4,61
X	3,32	1,05	3,24	3,10	3,42
H	5,60	3,58	3,79	4,35	4,04
Tempo de processamento [u.t] - mix 3					
Modelo	Estação 1	Estação 3	Estação 5	Estação 7	Estação 9
C	3,65	4,20	5,73	3,38	4,61
B	3,31	5,09	6,41	4,88	4,61
F	2,38	5,07	6,41	4,48	4,61
X	3,32	2,00	2,22	2,96	3,42
H	6,27	4,27	2,23	4,44	4,04
Tempo de processamento [u.t] - mix 4					
Modelo	Estação 1	Estação 3	Estação 5	Estação 7	Estação 9
C	3,81	3,78	6,49	2,91	4,61
B	3,49	4,64	7,23	4,41	4,61
F	2,54	4,64	7,23	4,41	4,61
X	3,32	2,00	2,01	3,18	3,42
H	5,19	4,28	2,64	4,56	4,04
Tempo de processamento [u.t] - mix 5					
Modelo	Estação 1	Estação 3	Estação 5	Estação 7	Estação 9
C	4,96	3,48	6,47	2,99	4,61
B	4,62	4,34	6,64	4,49	4,61
F	3,69	4,20	6,64	4,49	4,61
X	3,16	2,95	1,33	3,26	3,42
H	4,57	4,97	2,11	4,60	4,04
Tempo de processamento [u.t] - mix 6					
Modelo	Estação 1	Estação 3	Estação 5	Estação 7	Estação 9
C	4,81	3,40	6,81	2,91	4,61
B	4,49	4,26	6,95	4,41	4,61
F	3,54	4,23	6,81	4,41	4,61
X	3,32	2,95	1,33	3,10	3,42
H	5,19	4,89	1,90	4,55	4,04