

Investigação do Desempenho de uma Linha de Montagem Mista na Indústria Automotiva por meio de Programação Matemática

Marcelo da Silva Meira (UTFPR) marcelo.meira@renault.com
Paulo Roberto Drevek (UTFPR) paulo.drevek.2@consultant.volvo.com
João Alfredo Sikorski Van der Neut (UTFPR) joao.svdn@hotmail.com
Luiz Carlos de Abreu Rodrigues (UTFPR) lcar@utfpr.edu.br
Leandro Magatão (UTFPR) magatao@utfpr.edu.br

Resumo

Este trabalho investiga diferenças de produtividade encontradas em Linha de Montagem de Modelo Misto (MALBP – *Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem*). A abordagem de solução se dá pela construção e resolução de modelos matemáticos em Programação Linear Inteira Mista (MILP – *Mixed Integer Linear Programming*) do problema de balanceamento, seguido do problema de sequenciamento de carros (PSC – *Car Sequencing Problem*). Uma simulação discreta foi utilizada para verificar os resultados dos modelos matemáticos. O estudo relata o caso real de uma linha de montagem da indústria automotiva. O objetivo é investigar como manter o melhor nível de produtividade da linha de produção e, ao mesmo tempo, manter a característica de flexibilidade para atender a uma demanda variável em volume e diversidade de produto. Resultados desse estudo indicam que se cuidados relativos ao balanceamento, sequenciamento dos produtos e forma de operação da linha não forem observados, perdas acumuladas na taxa de produção podem ser significativas (e.g., tempos de produção para algumas condições de teste ultrapassam em 30% o valor inicialmente estimado).

Palavras chave: Balanceamento de Linha de Montagem de Modelo Misto (MALBP), Sequenciamento de Linhas, Produção Flexível.

Performance Study of Mixed Model Assembly Line in Automotive Industry by Mathematical Programming

Abstract

This work uses Mixed Integer Linear Programming (MILP) to investigate productivity differences found in a Mixed Model Assembly Line Balancing Problem (MALBP). The solution approach was based on construction and resolution of MILP models for both: the MALBP, followed by the *Car Sequencing Problem* (CSP). A discrete Simulation was also used to check the results obtained by the mathematical models. The main objective is to investigate how to maintain productivity, while maintaining the flexibility characteristic to meet a variable demand in volume and product diversity. The obtained results indicate that if careful choices in balancing/sequencing and line design were not taken into account the cumulative loss in throughput may be significant (e.g., production time exceed 30% for the studied cases).

Key-words: Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem (MALBP), Production Sequence, Flexible Production.

1 Introdução

Num cenário de diminuição das margens operacionais, aumento dos custos com regulamentações e pressão da forte concorrência, a indústria automobilística busca novos padrões de desempenho. Operar no nível da excelência operacional em termos de competitividade é uma questão de sustentabilidade do negócio. Por outro lado, a flexibilidade em produzir produtos diferentes ou de responder rapidamente a uma mudança de volume de produção também é considerada uma vital vantagem competitiva. Nesse ambiente aparente de *tradeoff* entre produtividade e flexibilidade, está a linha de montagem. Desenvolvida a mais de um século para produção em massa, que significa produzir grandes volumes de um único produto de forma eficiente, e teve alterações pouco significativas desde o seu surgimento. Atualmente, a tendência é de uma crescente diversidade de produtos, ou modelos, que compartilham a mesma linha de montagem. Neste contexto, uma alternativa é o uso as linhas de montagem de produto/modelos mistos (ou linhas monofluxo). Para as linhas dedicadas, há somente um produto específico, normalmente com uma taxa de produção estável, e a questão do sequenciamento produtivo não é significativo. O balanceamento deste tipo de linha se reduz ao caso proposto por Scholl (1999), denominado SALBP (*Simple Assembly Line Balancing Problem*). Já na linha de produção do tipo monofluxo, produtos diferentes são sequenciados em um mesmo fluxo de forma que haja um nivelamento de diferentes demandas de produtos, ou modelos diferentes, consolidadas num único fluxo comum. Nesse caso, a questão do balanceamento passa a ter um nível de complexidade maior. Scholl (1999) classifica o problema como MALBP (*Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem*) e, nesse caso, tanto o sequenciamento quanto a variação das demandas de cada modelo de produto que compõem o *mix* de produção passam a ser fatores que dificultam um balanceamento ótimo da linha de produção do tipo monofluxo.

As principais vantagens das linhas monofluxo para uma produção mista são citadas por Wester e Kilbrige (1964) *apud* Scholl (1999) e por Rao (1971) como: i) permite um fluxo contínuo de cada produto ou modelo, ii) reduz inventário de produtos e peças; iii) elimina a necessidade de mudanças de configurações e *setup* da linha e permite uma grande flexibilidade na produção. A flexibilidade tem sido uma grande vantagem para responder às demandas variáveis. Contudo, as necessidades de customizações nos produtos acabam gerando perturbações que podem impactar na produtividade. O balanceamento ótimo da linha de produção, ou seja, a adequada atribuição de tarefas a estações de trabalho/trabalhadores ao longo da linha fica dependente da determinação de uma sequência programada de passagem dos diferentes produtos na linha. A atividade de balanceamento e sequenciamento da linha de montagem passa a ter uma importância fundamental para a melhoria dos níveis de produtividade desse sistema de produção.

2 Balanceamento e sequenciamento de linhas de montagem

Scholl (1999) e Thomopoulos (2014) descreveram alguns dos termos básicos da linha de montagem, como operação, tempo da tarefa, estação de trabalho, tempo de inatividade, atraso de balanceamento, tempo de ciclo, taxa de eficiência, gráfico de precedência entre outros. Segundo os autores, a operação de montagem é o processo de pega e encaixe de várias peças para criar um produto acabado. A operação (tarefa) é definida como uma porção do trabalho total contido no processo de montagem. Ou seja, trata-se do tempo da operação, como o tempo necessário para realizar a tarefa, no limite de ser considerado indivisível. Estação de trabalho é uma parte da linha onde certa quantidade de trabalho é realizada. É caracterizada por suas dimensões, e/ou tipo de equipamento, ou tipo de trabalho alocado. Tempo de ciclo é

definido como a quantidade máxima de tempo que uma peça a ser trabalhada ou processada no posto, para um caso de linha sincronizada contínua (esteira). Relacionado ao tempo de ciclo, está a taxa de produção no fim da linha que é igual ao inverso do tempo de ciclo. A diferença de tempo positiva entre o tempo de ciclo e o tempo do posto é chamada de tempo de inatividade, pois o operador está aguardando para realizar a próxima operação (inativo) durante esse período de tempo. A soma de todos os tempos de inatividade da linha é chamada de tempo de atraso de balanceamento. O gráfico de precedência é relacionado às restrições tecnológicas, e o ordenamento no qual as operações que precisam ser executadas devem estar pré-especificadas.

Considerando os estudos proposto por Scholl (1999) a linha de montagem pode ser classificada nas seguintes características principais: em relação ao número de modelos, forma de controle da linha, frequência de alteração, nível de automação e atividade do negócio. Em relação a número de modelos, a linha pode ter a característica de produzir um único modelo de forma contínua em grande quantidade (linha de modelo simples). De acordo com autor, numa linha do tipo contínua com passo sincronizado (*paced lines*) cada peça a ser montada é movida de forma progressiva de um posto para outro numa velocidade constante. Já para as linhas que possuem um sistema de passo não sincronizado, a linha fica parada enquanto o operador realiza o trabalho. O deslocamento da peça principal ocorre somente no final do trabalho. Nesse caso, o sistema de passo ainda difere em duas situações. Na primeira situação a peça é liberada para seguir ao posto da frente, desde que o posto da frente esteja vazio. Por isso, é recomendada a alocação de *buffers* entre cada posto nesse tipo de linha. Na segunda situação, quando não existe a alocação de postos pulmões (*buffers*), duas novas ineficiências podem ocorrer. A perda um seria pelo bloqueio da peça por impossibilidade de avançar para o próximo posto, impedindo dar continuidade ao trabalho. A perda dois seria o desabastecimento do posto que ocorre quando o posto pulmão permanece vazio além do tempo previsto.

Alguns autores como Askin e Standridge (1993) e Scholl (1999) discutem o uso de sistemas de montagem de modelo misto. Neste sistema vários tipos diferentes de produtos podem ser montados simultaneamente na mesma linha. Geralmente, a sequência da ordem de entrada dos modelos é planejada e mantida numa proporção previamente definida. As linhas de modelo misto geralmente são do tipo não contínuo (assíncrona) para permitir uma flexibilidade do tempo de operação variável entre modelos. Nos problemas de modelo misto (MALBP – *Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem*) há necessidade de se encontrar uma sequência eficiente de produção dos diferentes modelos (versões) de produtos na linha, demandando-se um planejamento de curto prazo da sequência produtiva. O objetivo do presente trabalho envolve encontrar uma solução otimizada para um MALBP-2, ou seja, para um dado número de postos, busca-se minimizar o tempo de ciclo c . Em particular, o caso em estudo envolve uma linha automotiva de baixa cadência, com produção aproximada de 14 veículos/hora.

Sobre o problema de sequenciamento de carros (PSC) abordado por Boysen, Flidner e Scholl (2009) é sugerido que, ao invés de programar o conteúdo de trabalho, o PSC considere o controle de opcionais de produto para evitar sobrecarga de trabalho. Os produtos com opcionais podem ser submetidos a regras de sequenciamento, nas quais o objetivo é restringir o número máximo de ocorrências numa subsequência num dado período de análise. O problema consiste na procura de uma sequência dos produtos que atenda a demanda requisitada, sem violação das regras de sequenciamento. A regra de sequenciamento segue a forma $H_o:N_o$, a qual significa que, na produção de N_o produtos sucessivos, somente H_o produtos podem conter o opcional para evitar sobrecarga de trabalho.

3 Desenvolvimento

O caso do estudo ocorre no departamento de carroceria de uma montadora de veículos utilitários. A linha de montagem comum é alimentada por outros três processos de cada produto conforme itens 1, 2 e 3 indicados na Figura 1. Esses processos precedentes apresentam restrições de capacidade, que limitam a máxima combinação possível de itens similares na formação da sequência, fato que foi devidamente considerado nas restrições do modelo matemático. O item 4 representa as vagas disponíveis para retoques no final de linha, quando ocorre um problema de qualidade. No item 5 da Figura 1 está ilustrada a linha comum que é objeto da análise. O item 6 na Figura 1 é um *buffer* de até 17 posições, que, para as condições do problema em análise, possibilita recuperar um percentual da sequência de produção entre o processo de carroceria e pintura. Essa recuperação da sequência é necessária para atender as restrições dos processos posteriores, como otimização de lote de pintura em relação às trocas de cores nos equipamentos, como as purgas nas pistolas de pintura. Posteriormente à pintura, é necessário refazer a sequência dos produtos para atender a programação das entregas sincronizadas de fornecedores na linha de montagem final.

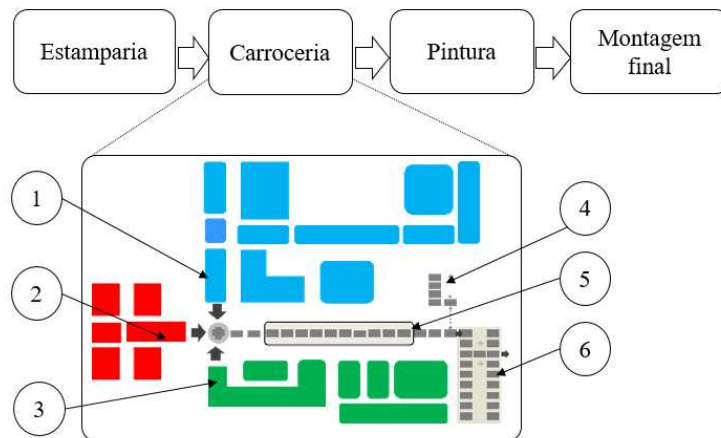


Figura 1 – Escopo do estudo – balanceamento/sequenciamento

O problema detectado consiste, basicamente, da aparente perda de produtividade ocasionada pelas diferenças dos tempos de produção de três diferentes plataformas de carrocerias de veículos, que são montadas numa mesma linha comum. As carrocerias dos veículos em análise são as de um furgão, uma *pick-up* e um mono volume. No caso do furgão há, ainda, três variantes de produtos sensíveis ao processo, gerando diferentes operações nos postos. Assim, em termos de análise prática, existem cinco diversidades (modelos) de produtos.

3.1 Abordagem de solução

Para o estudo, foram avaliados os pedidos de um determinado período de uma amostra de 12 semanas. Por motivo de delimitar o problema, foram selecionados seis *mixes* do período, conforme relacionado na Tabela 1. A intenção foi simular variações que de fato ocorrem em função de sazonalidades de demandas orientadas pelo mercado. Como consequência, na Tabela 1, na primeira coluna está descrito o TTPP (Tempo das Tarefas Por Produto), nas colunas seguintes foram relacionadas as proporções de quantidade por modelo, de forma que a soma total resultasse em 14 veículos/hora (v/h), valor característico da taxa de produção da

linha de baixa cadência em análise. Desta forma, as comparações de horizonte de tempo de produção (WS) ocorrem em relação a um referencial de produção de 14 v/h.

TTPP [min]	Produto	mix1	mix2	mix3	mix4	mix5	mix6
42,40	F	5	2	3	3	4	5
43,71	B	1	1	2	1	2	2
36,06	C	3	3	2	1	1	0
34,59	H	5	5	5	6	5	5
24,12	X	0	3	2	3	2	2
Total (Peças/hora)		14	14	14	14	14	14

Tabela 1 – Mix de produtos considerado nos estudos

Tendo por base a inerente dificuldade de solução computacional de se tratar de forma agregada por Programação Linear Inteira Mista (MILP – *Mixed Integer Linear Programming*) os problemas de balanceamento e sequenciamento, descrita por Ozturk *et al.* (2013), para o caso estudado, optou-se pela separação do problema em duas etapas, recomendadas em Rao (1971) e Scholl (1999): (i) realizar o balanceamento da linha comum de montagem da carroceria; (ii) seguir-se com o estudo de sequenciamento dos produtos a entrar na linha de produção. Na Figura 2 é ilustrado como o problema foi dividido.

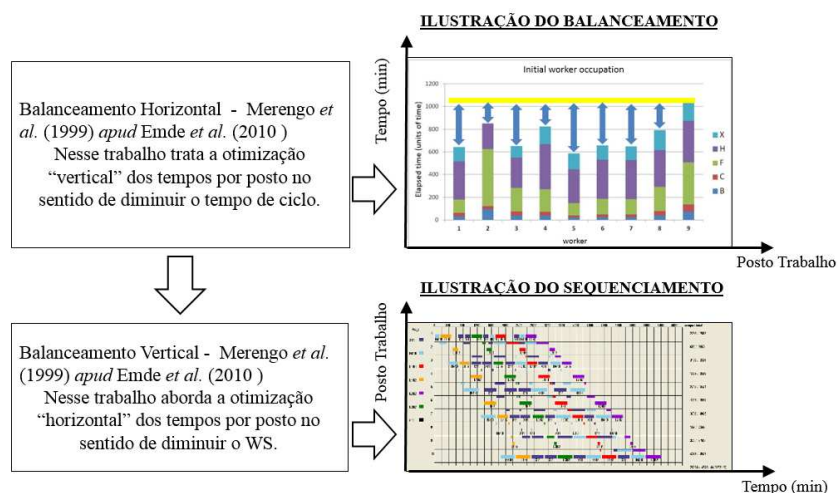


Figura 2 – Abordagem da solução do problema de otimização

Na questão do balanceamento, o objetivo é realizar a “otimização vertical dos tempos”, procurando pela melhor distribuição das tarefas ao longo dos postos de trabalho. Já no sequenciamento, o objetivo é a “otimização horizontal dos tempos”, obtendo-se a melhor sequência de produção possível dentro dos limites do melhor balanceamento. Merengo *et al.* (1999) *apud* Emde *et al.* (2010) introduziram o conceito de balanceamento horizontal e vertical com o objetivo de suavizar a carga de trabalho nos postos das linhas de modelo misto. Conforme a proposta dos autores, o balanceamento horizontal tem em sua função objetivo três propostas de otimização do tempo de processamento, envolvendo: i) o tempo de ciclo, ii) a média dos tempos de processamento de um modelo por posto e iii) a média dos tempos de processamento de todos os modelos por postos, respectivamente. Já em relação ao balanceamento vertical, o objetivo é uma distribuição uniforme da carga de trabalho entre

todos os postos e dessa forma o tempo médio de operação de cada posto vai depender do tempo médio de processo de todos os modelos por estação. Para a adaptação do caso em estudo, os objetivos do balanceamento horizontal estão contidos no modelo MILP do balanceamento (forçando uma otimização vertical dos tempos) e o balanceamento vertical está inserido no modelo MILP de sequenciamento (forçando uma otimização horizontal dos tempos).

O trabalho sobre otimização do balanceamento consistiu em aperfeiçoar a atribuição de tarefas de forma a minimizar os tempos de ciclo e as diferenças das sobrecargas de tarefas entre os postos. Nesse processo de otimização foi realizado o estudo da linha, onde 240 tarefas comuns para os produtos F, B e C, outras 182 tarefas para o produto H e 190 tarefas para produto X foram levantadas dos dados das folhas de operação padrão. A partir da atribuição dos tempos de tarefas de um produto, obteve-se o resultado do agrupamento realizado, totalizando 288 tarefas comuns. Essas 288 tarefas, foram reagrupadas em operações de montagem das carrocerias, respeitando um gráfico de precedência comum, de forma a racionalizar a execução das atividades. Essa simplificação de quantidade de tarefas agrupadas em operações simplifica o processo e faz uma ligação com o processo real de montagem, eliminando as possibilidades de combinação não factíveis na prática. Essa etapa do problema é bastante crítica e importante, pois além de simplificar o modelo matemático, faz uma ligação com o mundo real.

Na Figura 3 é ilustrada a abordagem da solução. Primeiramente obteve-se os tempos das tarefas de cada modelo e as restrições de montagem, conforme descrito em Neut (2013) em conjunto com a definição dos *mixes* de produtos, conforme descrito anteriormente.

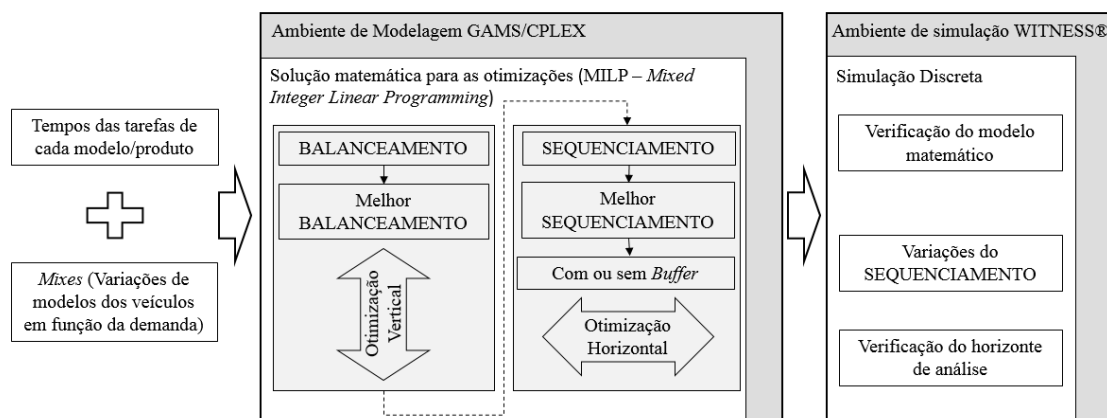


Figura 3 – Ilustração da abordagem de solução do problema

Com os dados formulados, foi utilizado o modelo do balanceamento para realizar a atribuição de tarefas na condição ótima. O resultado de alocação dos tempos desse balanceamento foi utilizado como dado de entrada para o modelo de sequenciamento. Esses tempos foram carregados como arquivo externo lido no GAMS/CPLEX. Executa-se, então, o modelo de sequenciamento e gera-se o arquivo com a indicação da sequência e os tempos de produção do lote de 14 veículos em série. Os dois modelos matemáticos foram desenvolvidos no ambiente de modelagem GAMS/CPLEX. Com o modelo do sequenciamento foi obtido indicações de sequências otimizadas, que foram representadas em cartas de *Gantt*. A partir das sequências geradas foram realizados os testes no ambiente de simulação WITNESS.

3.2 Modelo matemático para o balanceamento

Os resultados dos tempos de atribuição de tarefas foram obtidos da solução ótima encontrada pelo modelo MILP do balanceamento. Em seguida, foram utilizados como entrada para a abordagem de otimização do sequenciamento. A função objetivo do modelo de balanceamento é apresentada na equação (1). O modelo matemático completo é detalhado no trabalho de Neut (2013).

$$\begin{aligned} (\min) z_{bal} = & M * \underbrace{\sum_x ciclo_x}_{fator1} + N * \underbrace{\sum_x \sum_m difer_{m,x}}_{fator2} + \\ & + V * \underbrace{\sum_o \sum_m \sum_p diferenc_{o,m,p}}_{fator3} + \underbrace{\sum_i \sum_p \sum_l analisa_{i,p,l}}_{fator4} \end{aligned} \quad (1)$$

A primeira parcela da função objetivo (*fator1*) soma os tempos de ciclo de cada *mix x* ($ciclo_x$), multiplicados pela constante *M*. Esta constante impõe um peso maior ao fator ciclo, que esquematicamente é ilustrado na Figura 4, no gráfico da esquerda. A segunda parcela da expressão (*fator2*) minimiza a diferença entre o tempo do posto e a média dos carregamentos dos postos, com peso *N*, esquematicamente ilustrado no gráfico central da Figura 4. A terceira parcela da expressão (*fator3*) avalia a soma das diferenças na ocupação da mão de obra (quando há dois operadores num mesmo posto), $diferenc_{o,m,p}$, indicado no gráfico à direita da Figura 4. Por fim, a última parcela da expressão (*fator4*), a qual envolve a variável $analisa_{i,p,l}$, minimiza a realocação de tarefas do balanceamento em relação à condição inicial da linha, ou seja, busca-se minimizar os custos envolvidos em realocar tarefas.

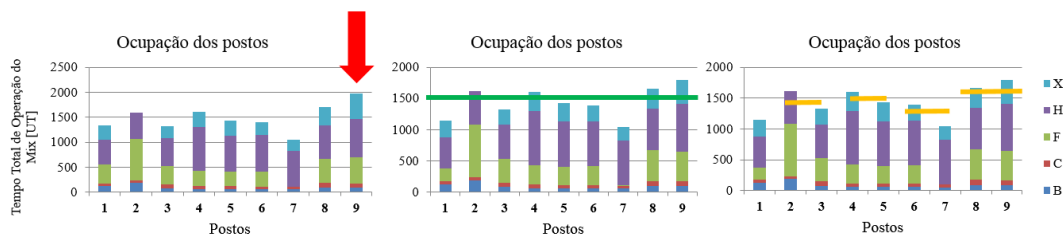


Figura 4– Ilustração do efeito das equações no “balanceamento vertical”

3.3 Modelo matemático para o sequenciamento

No modelo de sequenciamento, o objetivo é reduzir o tempo de produção total do horizonte WS de uma determinada sequência de produção. A equação da função objetivo é definida por dois critérios, conforme ilustrado na equação (2). O primeiro critério ou objetivo é a minimização da duração (tempo total de ocupação) da mão de obra mais carregada (alocada sempre a dois postos neste problema) conforme ilustrado na Figura 5 pela variável “*dur_max*”. Esta parcela é a principal em termos de importância, e por isso é atribuído um peso com a multiplicação de um fator *BigM*. A mão de obra mais carregada é definida por outras duas restrições e identificada na variável *dur_max*. O segundo critério, é a soma dos tempos de ocupação de todos os postos de trabalho, onde $ocupa_m$ identifica o tempo de ocupação do posto *m*. A alocação dos produtos às posições da sequência de produção é controlada pelas restrições propostas, as quais foram customizadas a partir do modelo para otimização de *flowshop* apresentado em Guéret *et al.* (2000). Para o exemplo ilustrado no

gráfico de Gantt da Figura 5, para o *label* destacado como “Ocupa m”, indica-se que o veículo do modelo H estaria ocupando, quando passar pelo posto 01, a 11ª posição no sequenciamento, com um tempo acumulado próximo de 51 minutos.

$$(\min) z_{seq} = BigM * dur_max + \sum_m ocupa_m \quad (2)$$

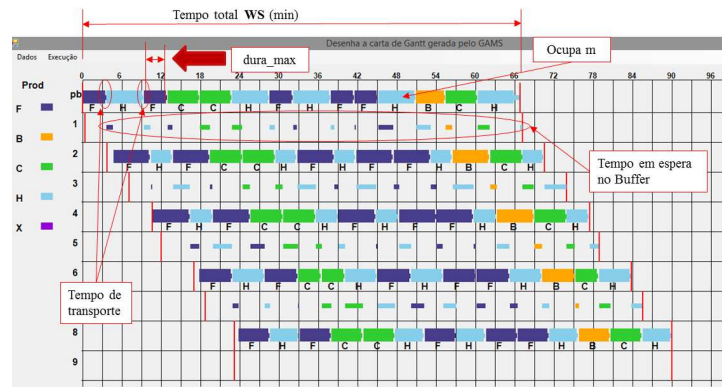


Figura 5 – Gráfico de Gantt

3.4 Modelo de simulação discreta

Para aplicação da simulação discreta, foi utilizado o *software* WITNESS (LANNER, 2012). O propósito do uso do simulador foi o de verificar os resultados do modelo matemático de sequenciamento. O modelo de simulação discreta foi construído com a representação gráfica de 10 postos (P1 a P10). Na Figura 6, é ilustrada a linha de montagem no ambiente de simulação. As figuras de veículos ilustrados a esquerda pelas letras F, B, C, H e X representam os veículos reais, com os tempos de operação associados. Essa implementação foi realizada a partir do elemento “Posto”, já que o elemento “Buffer” não foi utilizado. O posto é representado na figura como P1 a P10. Assim o “Posto” emula também a existência de *buffers*. Ainda na Figura 6, é ilustrado o elemento variável indicado por cadência, que registra o número de peças produzidas no intervalo de uma hora (que passaram pelo posto P10). Nos postos com operação, foram incluídas as variáveis “Tcy” de cada posto para cada produto F, B, C, H e X. Também foi criada a variável “Mov” para o tempo de transporte entre os postos (adotado o tempo de 0,25 minuto). Onde os postos estavam atuando como *buffers*, os tempos das variáveis Tcy de cada produto foram adotados como zero.

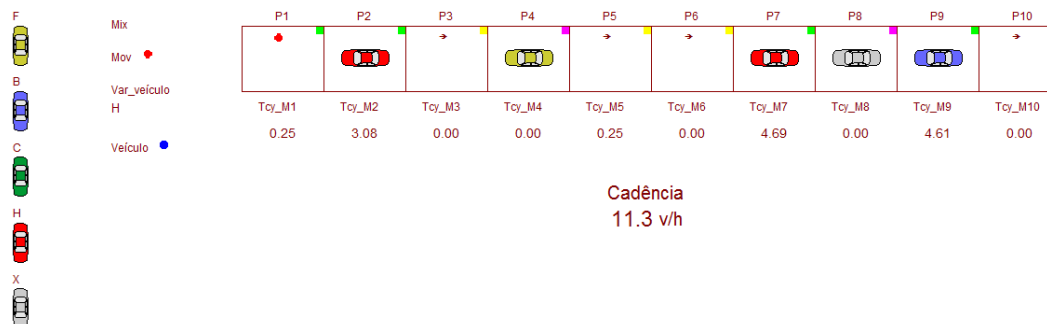


Figura 6 - Modelo da linha de montagem no WITNESS

4 Resultados

No desenvolvimento do sequenciamento otimizado através do modelo MILP foram realizados oitenta e cinco testes, nominados Teste#1 a Teste#85. Cada resultado de experimento foi compilado numa tabela, conforme ilustrado na Figura 7. Na primeira coluna é indicado o número do teste. Na segunda coluna é indicada a condição de balanceamento e sequenciamento que foi aplicado em cada *mix* de produtos. Por exemplo, para o Teste#1 tem-se o balanceamento com o *mix*1 (*b mix1*), seguido do sequenciamento com as demandas relativas ao *mix*1 (*d mix1*), tempo de transposto zero (*t=0*), sem *buffer* (*s_bf*). As colunas 1 a 14 indicam a sequência de entrada na linha, onde cada letra representa o modelo do produto, resultado da sequência otimizada indicada pelo modelo de sequenciamento. A coluna após o décimo quarto produto da sequência será a indicação do tempo WS (tempo de execução do lote dos 14 veículos no gargalo de produção), em minutos. A última coluna em análise é denominada “D1” e é calculada em relação ao menor valor de tempo WS de processamento (no gargalo de produção), obtido nos testes realizados.

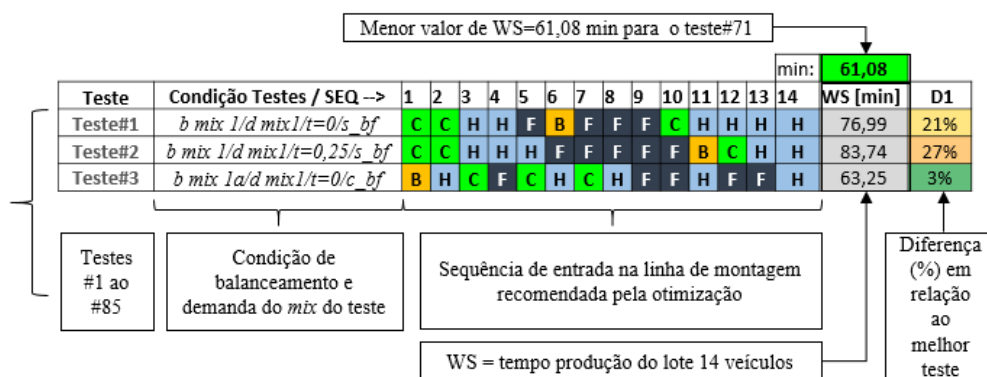


Figura 7 – Compilação dos experimentos

As execuções dos modelos matemáticos foram realizadas em um computador pessoal, com Processador Intel® Core™ i5-3337U CPU@1.80GHz, Memória RAM de 8 GB e Sistema Operacional de 64 bits, MS Windows 8. A versão do ambiente de modelagem e otimização utilizado foi o GAMS ® 23.5.2 x86/MS Windows, CPLEX 12.2.0.0, conforme Tabela 2.

Modelo Matemático MILP	Número de tarefas	Número de Produtos	Número de Postos	Tempo de Execução (s)
Balanceamento	57	5	9	14.853
Sequenciamento sem <i>Buffer</i>	57	5	9	1.243
Sequenciamento com <i>Buffer</i>	57	5	6	0.445

Tabela 2- Referência de tempo de execução dos modelos matemático MILP

A Tabela 3 apresenta uma síntese das melhores sequências para balanceamentos ótimos. Esta tabela denota que existe um balanceamento ótimo para cada *mix* de produtos. Observa-se uma variação de até 8% nos tempos (no gargalo de produção). Porém, por exemplo, poderá ocorrer de em um dia ser necessária a produção do *mix*1, ainda que seu WS seja 8% maior que o do *mix*4. Logo, a produção de diferentes *mixes* resultarão na variação das produtividades horárias.

Testes	Condição testes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	WS [min]	Dif.
Teste#35	b mix 1/d mix1	H	C	F	H	F	C	B	H	F	H	H	F	C	F	66,75	8%
Teste#57	b mix2/d mix2	B	C	H	H	X	F	H	C	H	X	F	H	C	X	61,62	1%
Teste#64	b mix3/d mix3	H	B	X	B	H	F	H	F	H	F	H	C	X	C	62,81	3%
Teste#71	b mix4/d mix4	X	B	H	X	F	X	H	F	H	C	H	H	F	H	61,08	0%
Teste#78	b mix5/d mix5	F	H	F	X	B	H	C	H	B	X	F	H	F	H	63,21	3%
Teste#85	b mix6/d mix6	X	F	H	F	H	F	X	B	H	F	H	B	H	F	63,61	4%

Tabela 3 – Síntese das seqüências ótimas obtidas

Na Figura 8 são ilustrados os oitenta e cinco testes plotados num gráfico que mostra a evolução dos experimentos. Nos primeiros testes, foi avaliada a questão do tempo de transporte, alguns tipos de *mixes*, e os primeiros testes com a existência de *buffers*. Também foram realizados testes, por exemplo do Teste#41 ao Teste#45, com o mesmo resultado (WS), mas com seqüências diferentes para um mesmo *mix*. A partir do Teste#41, também foi iniciada a avaliação das influências do *mix1* ao *mix6*. É possível observar a relação do aumento do tempo WS com o *mix* mais carregado do produto com maior tempo (TTPP, descrito na Tabela 1) No teste 55, foi retirado o *buffer* do modelo do sequenciamento para comprovar o aumento do tempo WS, para um mesmo balanceamento/sequenciamento.

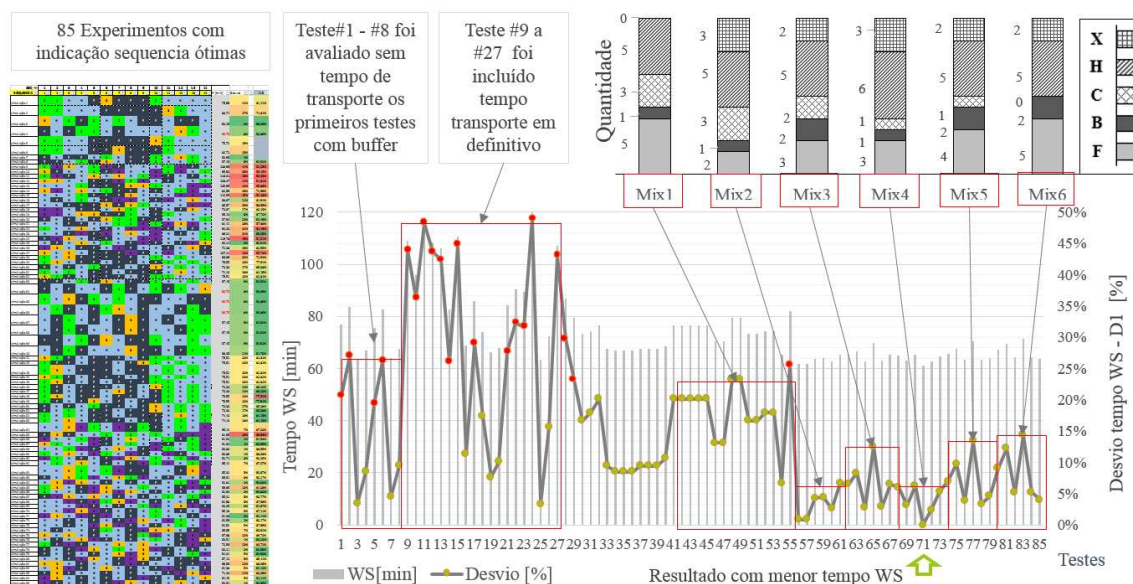


Figura 8 – Ilustração do registro dos testes de sequenciamento

O objetivo do trabalho prevê investigar como ocorrem as perdas do sistema, diminuindo-se o tempo WS. Há também a possibilidade de se diminuir o número de postos, mantendo-se a produtividade. De fato, obteve-se com a condição otimizada de balanceamento seguida do sequenciamento uma redução de três postos, conforme ilustrado na Tabela 4. Essa redução de nove para seis postos representa uma melhoria na produtividade de 33%, mantendo praticamente a mesma taxa de produção teórica (13,7 v/h). Importante ressaltar que esse resultado só foi possível ser aplicado na prática com mudanças estruturais na linha, como redistribuição de tarefas, inclusão de *buffers* e mudança na forma de abastecimento de sistema de peças na borda da linha para sistema JIT (*Just In Time*).

Configuração da linha de montagem	Número de postos	Número de posto convertido em buffer	Taxa de produção (v/h)	Solução
	9	0	14	<i>Ad hoc</i>
	6	4	13,7	Exata pelo modelo MILP do balanceamento e sequenciamento

Tabela 4- Evolução da configuração da linha comum.

Houve uma diferença média de 5,5% com um desvio padrão de 0,7% nos valores obtidos no modelo matemático e no modelo de simulação, diferença esta indicada na Tabela 5. Essa diferença é explicada por uma simplificação na restrição de tempo de transporte no modelo matemático, para o caso de linha de passo não sincronizado.

Testes	Tempo de produção WS [min]	Taxa de produção (v/h) GAMS	Taxa de produção (v/h) WITNESS	Diferença
Teste#62	65,32	12,9	12,0	6,70%
Teste#57	61,62	13,6	12,9	5,40%
Teste#46	70,30	11,9	11,4	4,60%
Teste#71	61,08	13,8	13,0	5,50%
Teste#72	62,59	13,4	12,7	5,40%
Teste#85	63,61	13,2	12,5	5,30%

Tabela 5 – Comparação de experimentos no GAMS e WITNESS

5 Conclusões

Os resultados obtidos indicam que, além do balanceamento, também há outras influências que interferem na taxa de produção da linha de montagem mista (MALBP) e, consequentemente, na produtividade do processo como um todo. Os dois principais fatores identificados nesse estudo foram: (i) a combinação adequada de balanceamento e sequenciamento, que sofrem influência da demanda, conforme *mixes* de produção avaliados e, (ii) a existência/ausência de *buffers* entre postos que, para esse tipo de linha com passo não sincronizado, tem um efeito bastante significativo na recuperação da taxa de produção.

A primeira influência observada foi que conforme as demandas/*mixes* utilizados para a realização do balanceamento, acarreta-se, posteriormente, uma variação dos tempos de operação, que têm uma relação direta com a sequência de produção. Impacta-se, assim, de forma “mais ou menos” intensa a produtividade. Nos casos testados observou-se que “balanceamentos/*mixes* adequados” produziam, na média, uma perda menor na taxa de produção (diferença nos tempos WS entre 4% e 19%).

A segunda influência avaliada foi a alocação de *buffers* entre os postos de trabalho, o que resultou em recuperação da taxa de produção. As variações do tempo WS com e sem *buffer* foram significativas, sendo que o uso de *buffers* permitiu uma expressiva redução dos tempos de produção WS (e.g., 20% em média). A inclusão de *buffer* para linhas do tipo passo não sincronizado é recomendada na literatura, e.g. em Scholl (1999) e Askin e Standridge (1993). Portanto, o papel do *buffer* como elemento de recuperação da capacidade perdida (pela variabilidade dos tempos das operações dos produtos diferentes operando numa mesma linha comum) pode ser observado no presente estudo como uma contra medida para conferir flexibilidade às linhas monofluxo.

Referências

ASKIN, Ronald G. e STANDRIDGE, Charles R. *Modeling and analysis of manufacturing systems* - John Wiley & Sons, New York - 1993.

BOYSEN, Nils; FLIEDNER, Malte e SCHOLL, Armin. *Sequencing Mixed-Model Assembly Lines: Survey, Classification and Model Critique* - International Journal of Production Economics -Elsevier, Volume 192, Issue 2, Pages 349–373 - January 2009

EMDE, Simon; BOYSEN, Nils e SCHOLL, Armin. *Balancing mixed-model Assembly lines: A computational evaluation of objectives to smoothen workload* - Taylor & Francis - ISSN: 0020-7543 (pISSN) – 2010

GUÉRET, Christelle; PRINS, Christian e SEVAUX, Marc. *Applications of optimizations with Xpress* - MP - Editions Eyrolles - Paris - France - 2000.

LANNER Groupe - *Learning WITNESS Book One Manufacturing Edition -Users Manual* - 2012

NEUT, João A. S.V. D. Monografia do Projeto de Pesquisa “Balanceamento da Linha Final de Carroceria de uma Fábrica de Veículos Utilitários com o Uso de Programação Linear Inteira Mista e Validação Através de Simulação”, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curitiba - 2013.

OZTURK, Cemalettin; TUNAH, Semra; HNIC, Brahim e ORNEK, M. Arslan. *Balancing and scheduling of flexible mixed model assembly lines* - Springer - New York - 2013.

RAO, Dodla Nageswara. *Single and Mixed-Model Assembly Line Balancing Methods for Both Deterministic and Normally Distributed Work Element Times* - Thesis Master of Science - Oregon State University - 1971.

SCHOLL, Armin. *Balancing and Sequencing of Assembly Lines* - 2a., rev. ed. - Heidelberg : Physica-Verlag - 1999.

THOMOPOULOS, Nick T. *Assembly Line Planning and Control* - Springer International Publishing Switzerland 2014.