5

Referências Bibliográficas

ANFAVEA, <http://www.anfavea.com.br> Visitado em Janeiro/2013

BECKER, C., SCHOLL, A. **A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing**. European Journal of Operational Research v.168, p.694–715, 2006

BOLAT, A. **A mathematical model for selecting mixed models with due dates**. International Journal of Production Research v.41, p.897– 918, 2003

BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. **Assembly line balancing: Which model to use when?** Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 23/2006

BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A. **Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique**. European Journal of Operational Research, v.192, p.349-373, 2007

CARVALHO, E. G.; PINHO, M. **Perspectivas do investimento em mecânica** Projeto perspectivas de investimento no Brasil. São Carlos, 2009

ESTELLON, B.; GARDI, F.; NOUIOUA, K.; **Large neighborhood improvements for solving car sequencing problems**. RAIRO-Operation v.40, n. 4, p. 355-379, 2006

ESTELLON, B.; GARDI, F.; NOUIOUA, K.; **Two local search approaches for solving real-life car sequencing problems**. European Journal of Operational Research v.191, p.928–944, 2008

FLIEDNER, M.; BOYSEN, N. **Solving the car sequencing problem via Branch & Bound**. European Journal of Operational Research v.191, p.1023–1042, 2008

FISHER, M.; ITTNER, C. **The impact of product variety on automobile assembly operations: empirical evidence and simulation analysis**. Management Science, v. 45, n. 6, p. 771-786, 1999

GAGNÉ, C.; GRAVEL, M.; PRICE, W.L., **Solving real car sequencing problems with ant colony optimization**. European Journal of Operational Research v. 174, p. 1427–1448, 2006

GENT, I.P.; WALSH, T.. **CSPLib: a benchmark library for constraints**. Technical report, APES-09-1999, 1999. Available at <http://www.csplib.org/> visitado em Janeiro/2013

GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa 3ª Ed.** – São Paulo: Atlas, 1991

GRAVEL, M.; GAGNÉ, C.; PRICE, W.L. **Review and comparison of three methods for the solution of the car sequencing problem**. Journal of the Operational Research Society, v. 56, p. 1287–1295, 2005

HINDI, K.; PLOSZAJSKI, G. **Formulation and solution of a selection and sequencing problem in car manufacturer**. Computers ind, Engng vol. 26, n. 1, p. 203-211, 1994

HOLWEG, M.; JONES, D.T.. **The build-to-order challenge**. AutomotiveWorld Jan–Feb, p.40–45, 2001

IBGE, <http://www.ibge.gov.br> Visitado em Janeiro/2013

KIS, T. **On the complexity of the car sequencing problem** Operations Research Letters 32, P. 331 – 335, 2004

LESERT, A.; ALPAN, G.; FREIN, Y.; NOIRÉ, S. **Definition of spacing constraints for the car sequencing problem**. International Journal of Production Research, Vol. 49, p.963–994, 2011

MEYR, H. **Supply chain planning in the German automotive industry** OR Spectrum, v.26, p. 447–470, 2004

MILTENBURG, G.J. **Level schedules for mixed-model assembly lines in just-in-time production systems**. Management Science v.35, p.192–207, 1989

MORESI, Eduardo. **Metodologia da Pesquisa**. Pós-graduação stricto sensu em Gestão do Conhecimento e Tecnologia da Informação. Universidade Católica de Brasília. Brasília, Distrito Federal, 2006

PARRELLO, B.D.; KABAT, W.C.; WOS, L.. **Job-shop scheduling using automated reasoning: a case study of the car sequencing problem**. Journal of Automated Reasoning, v. 2, p.1–42, 1986

PRANDTSTETTER, M. **Exact and heuristic methods for solving the Car Sequencing Problem**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Tecnologia.Vienna, Austria, 2005

ROADEF, 2005. <http://challenge.roadef.org/2005/fr/> Visitado em Janeiro/2013

ROCHA, C. **Heurísticas para o problema de sequenciamento da produção de carros**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2005

SCAVARDA, L.F.; BARBOSA, T.P.W.; HAMACHER, S.. **Comparação entre as Tendências e Estratégias da Indústria Automotiva no Brasil e na Europa**. Gestão e Produção (UFSCar), São Carlos, v. 12, n. 3, p. 361-375, 2005

SOLNON, C.; CUNG, V. D.; NGUYEN, A.; ARTIGUES, C. **The car sequencing problem: Overview of state-of-the-art methods and industrial case-study of the ROADEF'2005 challenge problem**. European Journal of Operational Research v. 191, p. 912–927, 2008

XIAOBO, Z.; ZHOUB, Z.; ASRES, A. **A note on Toyota's goal of sequencing mixed models on an assembly line**. Computers & Industrial Engineering, p. 57-65, 1999

WESTER, L.; KILBRIDGE, M.. **The assembly line model-mix sequencing problem**. Third international conference on Operation Research, Oslo 1963, pp. 247–260, 1964

YANO, C.A.; RACHAMADUGU, R.. **Sequencing to minimise work overload in assembly lines with product options**. Management Science, v.37, n.5, 572–586, 1991

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e método**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2005

6 Apêndice

Apêndice A – Modelo matemático completo proposto para cenário de demanda além da capacidade

Índices

t, t'	Representa um período no horizonte de planejamento. $t = 1, \dots, T$
s	Subperíodo de t . $s = 1, \dots, Z$. $Z =$ o número total de caminhões a serem sequenciados em T períodos
i	Índice de configurações de caminhão. Os veículos idênticos foram agrupados em classes e chamados de configurações i . $i = 1, \dots, I$
m	Índice dos modelos disponíveis no portfólio. $m = 4x2, 6x4, \dots, M$ $M =$ número total de modelos de caminhões.
b	Índice de cores disponíveis no portfólio. $b =$ branco, preto, vermelho, ..., B
o	Índice de opcionais que provocam pesada carga de trabalho. $o = 1, 2, \dots, O$

Parâmetros

S_t^s	$\begin{cases} 1, & \text{se a sequência } s \text{ pertence ao período igual ou anterior a } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
j_i	$\begin{cases} 1, & \text{se a configuração } i \text{ deva ser sequenciado no primeiro período (} t = 1 \text{)} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
h_t^i	$\begin{cases} 1, & \text{se a configuração } i \text{ deva ser sequenciado antes do período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
a_i	Custo de atraso da configuração i
d_i	Demanda da configuração i
k_i^m	$\begin{cases} 1, & \text{se o modelo } m \text{ foi especificado na configuração } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
l_i	Comprimento do chassi da configuração i
r_i	$\begin{cases} 1, & \text{se a configuração } i \text{ exigir intervenção} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

c_i^b	$\begin{cases} 1, \text{ se a cor } b \text{ for especificada na configuração } i \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
u_i^o	$\begin{cases} 1, \text{ se a configuração } i \text{ contém o componente } o \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
p_o/q_o	No máximo p componentes o são esperados em q sequências, sendo $1 \leq p_o \leq q_o$
v_o	Custo de violação do opcional o
d_o	Demanda pelo opcional o na carteira de pedidos, definido como $\sum_i u_i^o d_i$
S_o	Capacidade de produção do componente o no horizonte de planejamento corrente, definido como $(p_o/q_o) \sum_s S_t^s$
t_m	Tempo médio de operação do modelo m .
tkt	<i>Takt Time</i>
L'	Comprimento máximo de dois chassis sucessivos
M	Big M. Neste caso, $M = 2\max(l_i) - L'$
G	Limite mínimo de sequências consecutivas para ocorrência de 1 (uma) intervenção
η	Peso dado à parcela de violações dos opcionais e adequação da capacidade na função objetivo
μ	Peso dado à parcela responsável por minimizar os indicadores de desvios entre o tempo real de processo e o <i>takt time</i> ;
λ	Peso dado à parcela responsável por minimizar troca de cores contabilizadas;
ρ	Peso dado à parcela responsável por minimizar custo total de atrasos de pedidos

Variáveis

χ_s^i	$\begin{cases} 1, \text{ se o pedido } i \text{ for alocado na sequência } s \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
α_s	Tempo de operação gerado na sequência s
δ_s	Módulo da diferença entre o <i>takt time</i> e o tempo de processo de 2 sequências consecutivas
β_s^b	$\begin{cases} 1, \text{ se em } s+1 \text{ e } s+2 \text{ houver uma cor diferente da cor } b \text{ alocada em } s \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$

ω_s^o	Número de violações do componente o cuja janela de sequências tem início na posição s
γ_i^t	Quantidade da configuração i em atraso no período t
π_o	Diferença entre a capacidade de produção do opcional o a quantidade escalonada na produção. Ou seja, adequação da capacidade do opcional o

Função objetivo

$$\text{Min } \mu(\sum_{s=1}^Z \delta'_s) + \lambda(\sum_s \sum_a \beta_s^b) + \rho(\sum_t \sum_i a_i \gamma_t^i) + \eta(\sum_s \sum_o v_o \omega_s^o + \sum_o c_o \pi_o)$$

Minimizar indicadores de desvios entre o tempo real de processo e o *takt time*;

mais troca de cores contabilizadas;

mais custo total de atrasos de pedidos;

mais custo total de violações dos opcionais e utilização da capacidade.

sujeito a

$$\sum_s \chi_s^i \leq d_i \forall i$$

(1) Limitação da demanda da configuração i a ser satisfeita

$$\sum_i \chi_s^i = 1 \forall s$$

(2) Uma configuração deve ser alocada na sequência s

$$\alpha_s = \sum_s \sum_i k_i^m \chi_s^i t_m \forall s$$

(3.2) Definição da variável α_s

$$\delta_s = |2tkt - (\alpha_s + \alpha_{s+1})| \forall s < Z$$

(4.2) Definição da variável δ_s

$$\sum_i (l_i \chi_s^i) + \sum_i (l_i \chi_{s+1}^i) \leq L' + M \sum_i (r_i \chi_s^i) \forall s$$

(5.1) Garante que a soma dos comprimentos de dois chassis sucessivos seja menor que L' . Não considerar caso haja intervenção na sequência.

$$\sum_i \sum_s^{s+G-1} r_i \chi_s^i \leq 1 \quad \forall s$$

(6.1) 1 intervenção permitida em G sequências consecutivas

$$\sum_i (c_i^b \chi_s^i - c_i^b \chi_{s+1}^i - c_i^b \chi_{s+2}^i) \leq \beta_s^b \quad \forall s, \forall b$$

(7.1) Definição da variável β_s^b

$$\omega_s^o \geq \sum_s^{s+q_o-1} \sum_i \chi_s^i u_i^o - p_o \quad \forall o, \forall s$$

(8.1) Caso em q_o sequências sucessivas a quantidade do componente o seja maior que p_o , penaliza-se a função objetivo proporcionalmente às ocorrências excedentes.

$$(\sum_{t=1}^t h_t^i) d_i - \sum_{s \in S_t^s} \chi_s^i \leq \gamma_i^t \quad \forall i, \forall t$$

(9.1) A demanda total da configuração i deve ser sequenciada antes do período indicado pelo parâmetro $h_t^i = 1$. Caso contrário, a quantidade não produzida será incorporada a γ_i^t , variável que conta ordens em atraso no período t .

$$\sum_{s \in S_t^s} \chi_s^i \geq j_i d_i \quad \forall i, t = 1$$

(10) A configuração i deve ser sequenciada no primeiro período ($t = 1$)

$$\pi_o = S_o - d_o - \sum_t \sum_i u_i^o \gamma_t^i \quad \forall o$$

(11.1) Definição da variável π_o

$$\chi_s^i, \beta_s^b \in \{1, 0\} \quad \forall i, b, s,$$

Declaração das variáveis binárias

$$\omega_s^o, \gamma_i^t \in \mathbb{R}_+ \quad \forall s, i, o, t$$

Declaração das variáveis reais positivas

$$\delta_s, \pi_o, \alpha_s \in \mathbb{R} \quad \forall o, s$$

Declaração das variáveis reais

Apêndice B – Modelo matemático completo proposto para cenário de demanda aquém da capacidade

Índices

t, t'	Representa um período no horizonte de planejamento. $t = 1, \dots, T$.
s	Subperíodo do período t . $s = 1, \dots, Z$. $Z =$ o número total de caminhões a serem sequenciados ao longo de T períodos
i	Índice das configurações. Os veículos idênticos foram agrupados em classes e chamados de configurações i . $i = 1, \dots, I$.
m	Índice dos modelos disponíveis no <i>portfólio</i> . $m = 4 \times 2, 6 \times 4, \dots, M$.
b	Índice de cores disponíveis no <i>portfólio</i> . $b =$ branco, preto, vermelho, ..., B.
o	Índice de opcionais que provocam pesada carga de trabalho. $o = 1, 2, 3, \dots, O$.
f	Índice das configurações a serem antecipados. Os veículos idênticos de uma carteira futura foram agrupados em classes e chamado de pedidos f . $f = 1, \dots, F$.

Parâmetros

S_t^s	$\begin{cases} 1, & \text{se a sequência } s \text{ pertence ao período igual ou anterior a } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
j_i	$\begin{cases} 1, & \text{se a configuração } i \text{ deva ser sequenciada no primeiro período (} t = 1 \text{)} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
h_t^i	$\begin{cases} 1, & \text{se a configuração } i \text{ deva ser sequenciada antes do período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
a_i	Custo de atraso da configuração i
d_i	Demanda da configuração i
d_f	Demanda da configuração f
k_i^m	$\begin{cases} 1, & \text{se o modelo } m \text{ foi especificado no pedido } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
k_f^m	$\begin{cases} 1, & \text{se o modelo } m \text{ foi especificado na configuração } f \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
l_i	Comprimento do chassi da configuração i
l_f	Comprimento do chassi da configuração f

r_i	$\begin{cases} 1, \text{ se a configuração } i \text{ exigir intervenção} \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
r_f	$\begin{cases} 1, \text{ se a configuração } f \text{ exigirá intervenção} \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
c_i^b	$\begin{cases} 1, \text{ se o a cor } b \text{ for especificada na configuração } i \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
c_f^b	$\begin{cases} 1, \text{ se o a cor } b \text{ for especificada na configuração } f \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
u_i^o	$\begin{cases} 1, \text{ se a configuração } i \text{ contém o componente } o \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
u_f^o	$\begin{cases} 1, \text{ se o componente } o \text{ foi especificado na configuração } f \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
p_o/q_o	No máximo p componentes o são esperados em q sequências, sendo $1 \leq p_o \leq q_o$
v_o	Custo de violação do opcional o
d_o	Demanda pelo opcional o na carteira de pedidos corrente, definido como $\sum_i u_i^o d_i$
S_o	Capacidade de produção do componente o no horizonte de planejamento corrente, definido como $(p_o/q_o) \sum_s S_t^s$
t_m	Tempo médio de operação do modelo m .
tkt	<i>Takt Time</i>
L'	Comprimento máximo de dois chassis sucessivos
M	Big M. Neste caso, $M = 2\max(l_i) - L'$
G	Limite mínimo de sequências consecutivas para ocorrência de 1 intervenção
η	Peso dado à parcela de violações dos opcionais e adequação da capacidade na função objetivo
μ	Peso dado à parcela responsável por minimizar os indicadores de desvios entre o tempo real de processo e o <i>takt time</i> ;
λ	Peso dado à parcela responsável por minimizar troca de cores contabilizadas;
ρ	Peso dado à parcela responsável por minimizar custo total de atrasos de pedidos

Variáveis

χ_s^i	$\begin{cases} 1, \text{ se a configuração } i \text{ for alocado na sequência } s \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
χ_s^f	$\begin{cases} 1, \text{ caso a configuração } f \text{ for alocada na sequência } s \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
α_s	Tempo de operação gerado na sequência s
δ_s	Módulo da diferença entre o <i>takt time</i> e o tempo de processo de 2 sequencias consecutivas
β_s^b	$\begin{cases} 1, \text{ se em } s+1 \text{ e } s+2 \text{ houver uma cor diferente da cor } b \text{ alocada em } s \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
ω_s^o	Número de violações do componente o cuja janela de sequências tem início na posição s
γ_t^i	Quantidade da configuração i em atraso no período t
π_o	Diferença entre a capacidade de produção do opcional o a quantidade escalonada na produção. Ou seja, adequação da capacidade do opcional o .

Função objetivo e restrições

$\text{Min } \mu(\sum_{s=1}^Z \delta'_s) + \lambda(\sum_s \sum_a \beta_s^b) + \rho(\sum_t \sum_i a_i \gamma_t^i) + \eta(\sum_s \sum_o v_o \omega_s^o + \sum_o c_o \pi_o)$	<p>Minimizar indicadores de desvios entre o tempo real de processo e o <i>takt time</i>;</p> <p>mais troca de cores contabilizadas;</p> <p>mais custo total de atrasos de pedidos;</p> <p>mais custo total de violações dos opcionais e utilização da capacidade.</p>
---	---

sujeito a:

$$\sum_s \chi_s^i \leq d_i \forall i$$

$$\sum_i \chi_s^i + \sum_f \chi_s^f = 1 \forall s$$

$$\alpha_s = (\sum_s \sum_i k_i^m \chi_s^i t_m) +$$

$$(\sum_s \sum_i k_f^m \chi_s^f t_m) \forall s$$

$$\delta_s = |2tkt - (\alpha_s + \alpha_{s+1})| \forall s < Z$$

$$\sum_i (l_i \chi_s^i) + \sum_f (l_f \chi_s^f) + \sum_i (l_i \chi_{s+1}^i) +$$

$$\sum_f (l_f \chi_{s+1}^f) - M(\sum_i r_i \chi_s^i + \sum_f r_f \chi_s^f) \leq L' \forall s$$

$$\sum_i \sum_s^{s+G-1} r_i \chi_s^i + \sum_f \sum_s^{s+G-1} r_f \chi_s^f + \leq 1 \forall s$$

$$\sum_i [(c_i^b \chi_s^i + c_f^b \chi_s^f) - (c_i^b \chi_{s+1}^i + c_f^b \chi_{s+1}^f) -$$

$$(c_i^b \chi_{s+2}^i + c_f^b \chi_{s+2}^f)] \leq \beta_s^b \forall s, \forall b$$

$$\omega_s^o \geq \sum_s^{s+q_o-1} \sum_i \chi_s^i u_i^o + \sum_s^{s+q_o-1} \sum_i \chi_s^f u_f^o -$$

$$p_o \forall o, \forall s$$

$$(\sum_{t'=1}^t h_{t'}^i) d_i - \sum_{s \in S_t^s} \chi_s^i \leq \gamma_i^t \forall i, \forall t$$

$$\sum_{s \in S_t^s} \chi_s^i \geq j_i d_i \forall i, t = 1$$

(1) Limitação da demanda da configuração i a ser satisfeita

(2.2) Uma única configuração (i ou f) deve ser alocada na sequência s

(3.2) Definição da variável α_s

(4.2) Definição da variável δ_s

(5.2) Garantir que a soma dos comprimentos de dois chassis sucessivos seja menor que L' . Não considerar caso haja intervenção.

(6.2) Uma intervenção permitida em G sequências

(7.2) Definição da variável β_s^b

(8.2) Caso em q_o sequências sucessivas a quantidade do componente o seja maior que p_o , penaliza-se a função objetivo proporcionalmente às ocorrências excedentes

(9.1) A demanda total da configuração i deve ser sequenciada antes do período indicado pelo parâmetro $h_t^i = 1$. Caso contrário, a quantidade não produzida será incorporada a γ_i^t , variável que conta ordens em atraso no período t .

(10) A configuração i deve ser

$$\pi_o = (S_o - d_o - \sum_f \sum_s \chi_s^f u_f^o) \forall o$$

$$\sum_s \chi_s^f \leq d_f \forall f$$

$$\chi_s^i, \beta_s^b, \chi_s^f \in \{1,0\}$$

$$\omega_s^o, \gamma_i^t \in \mathbb{R}_+ \forall s, i, o, t$$

$$\delta_s, \pi_o, \alpha_s \in \mathbb{R} \forall o, s$$

sequenciada no primeiro período ($t = 1$)

(11.2) Adequação da capacidade do componente o e a sua demanda escalonada para a produção

(12) Limitação da demanda da configuração f a ser antecipado

Declaração das variáveis binárias

Declaração das variáveis reais positivas

Declaração das variáveis reais