

2 Revisão da Literatura

Do fordismo à manufatura enxuta, introduzido pelo sistema Toyota de produção, variados conceitos vem influenciando diferentes níveis de decisão dentro do ambiente de produção de uma montadora.

Por exemplo, é bastante comum em linhas de montagem o sistema de produção chamado *paced assembly system*, pois permite que variados modelos sejam produzidos na mesma linha de montagem (BOYSEN *et al.*, 2006).

Esse sistema é composto por várias estações (ou postos) de trabalho dispostos sequencialmente, onde os produtos a serem montados são deslocados a uma velocidade constante, passando em cada um dos postos. Cada estação tem sua própria capacidade e restrições, pois é dedicada a um determinado conjunto de atividades.

Outro conceito que emergiu dentro das montadoras é o tempo de ciclo ou *takt time*, período no qual um produto é processado em um determinado posto. Esse tempo deve ser o mesmo para todas as estações de uma mesma linha, conferindo um ritmo constante ao trabalho. Veja um exemplo de *takt time* para uma linha de montagem de caminhões com três estações na Figura 1.

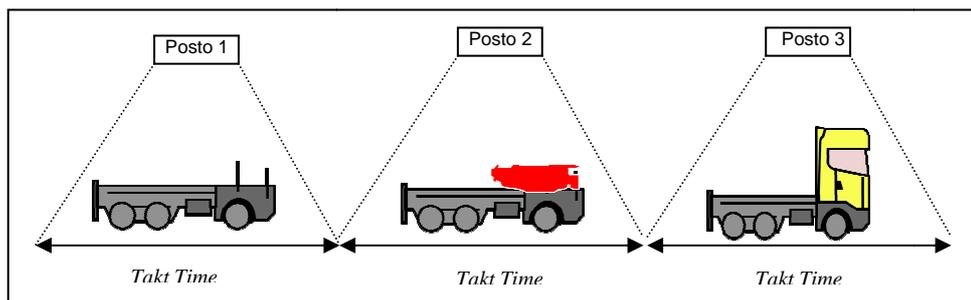


Figura 1 – Representação de uma linha de montagem contínua
Fonte: Própria autora

O balanceamento da linha de montagem consiste em atribuir operações aos postos de tal forma que a carga de trabalho de cada estação seja a mais homogênea possível e o tempo médio das tarefas realizadas não exceda o *takt time* (BECKER e SCHOLL, 2006).

No entanto, para alguns tipos de produtos (e em uma dada estação) o tempo necessário para completar as tarefas pode ser maior que o *takt time* (YANO e RACHAMADUGU, 1991). Nesse caso, o operador acumulará certo atraso e é esperado que os próximos carros a passarem por este posto demandem atividades cuja duração seja menor que o *takt time*. Se isso não acontecer o operador não terá como recuperar o atraso e será obrigado a pedir ajuda para o *utility worker* (profissional multi-tarefa responsável por ajudar os operadores com dificuldades na montagem) ou em casos extremos parar a linha de montagem, ocasionando uma sobrecarga de trabalho.

Logo, um dos desafios da indústria automobilística, diretamente ligado à eficiência e produtividade de sua linha de montagem, é definir as atividades a serem realizadas em cada estação de trabalho e suas sequências de execução de forma a minimizar o risco de parada da linha e custos de transição.

As montadoras dizem que são capazes de montar, teoricamente, milhões de combinações de diferentes modelos de automóveis. Fisher e Ittner (1999) calculam este número da seguinte forma: Nº de combinações = quantidade de diferentes carrocerias x quantidade de *power train* (motor e caixa de câmbio) x quantidade de pinturas e acabamento x $2^{\text{nº de opcionais de fábrica}}$. Esta variedade de modelos tem impacto direto no balanceamento de carga de trabalho nas estações e torna complexo o planejamento da produção, ou seja, decisões sobre quais carros devem ser produzidos em determinado período e qual a sequência ideal de entrada de linha.

Porém, esta variedade de modelos se justifica quando o foco da manufatura é o cliente, explicitado também em outro conceito que vem emergindo na indústria automotiva: o *Assembly-to-Order*. Esta abordagem diz que os produtos a serem planejados e montados devem ir de encontro a uma encomenda recebida, ou seja, a produção é orientada pela demanda.

Meyr (2004) descreve o sistema de planejamento da indústria automobilística a fim de oferecer clara compreensão das atividades associadas ao Planejamento Mestre da Produção e identifica desafios para aplicações de métodos da Pesquisa Operacional dentro deste contexto.

A seguir (seção 2.1), teremos uma visão geral sobre o que foi exposto por Meyr (2004), a fim de enxergar o problema de sequenciamento de uma maneira

mais ampla e apreender importantes características de longo e médio prazo que impactam no bom resultado do planejamento da produção de curto prazo.

2.1. Gerenciamento da cadeia de suprimentos automotiva

Em um ambiente de produção *Assembly-to-order* uma encomenda significa um pedido alocado pelo cliente¹. No entanto, os atuais esforços da cadeia de suprimentos focam em aumentar expressivamente a fatia de pedidos colocados pelo consumidor final e este conceito exige alto grau de flexibilidade e capacidade de resposta (veja, por exemplo, HOLWEG e JONES, 2001).

Para este propósito interações entre vários departamentos ocorrem, e dependendo da empresa as estruturas das organizações de vendas e rede de distribuição podem compreender vários níveis (concessionários, representantes, rede varejista, departamento central de vendas, setores de vendas responsáveis por diferentes áreas nos continentes e/ou nos países, subsidiárias em diferentes locais, etc). O horizonte de planejamento também pode divergir bastante, porém segundo Meyr (2004) geralmente compreendem em longo prazo – ciclo anual; médio prazo – ciclo mais curto, podendo alcançar entre 3 meses e 1 ano; e curto prazo – ciclo semanal, em geral de 3 a 6 semanas. A Figura 2 sintetiza as principais atividades de planejamento de uma indústria automotiva que serão detalhadas a seguir.

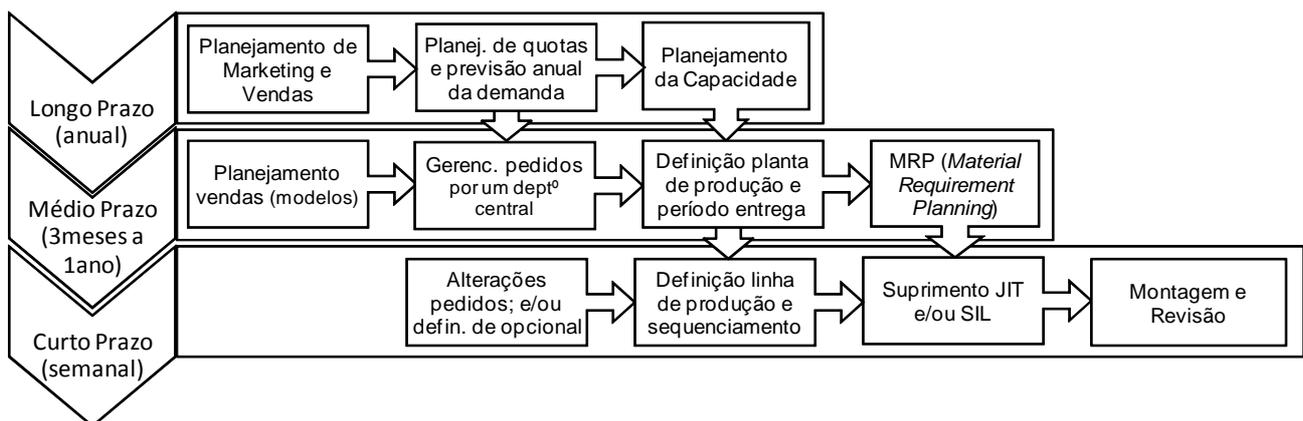


Figura 2 - Atividades e prazos de planejamento da indústria automotiva
Fonte: Baseado em MEYR (2004)

¹ Neste texto o termo cliente, responsável pela compra do produto advindo da montadora, refere-se simultaneamente ao consumidor final, concessionário ou o próprio departamento de vendas.

Inicialmente em um horizonte de longo prazo, fundamentada nas ações de marketing, assim como em dados históricos de vendas e preferências dos mercados, é feita a previsão de demanda para o ano seguinte. Nesta ocasião ainda são planejadas metas de volume para a produção e metas de vendas, há também negociações sobre cotas de produção que os concessionários terão direito de requerer do fabricante mensalmente.

Nesta primeira etapa, fala-se em tipos de chassis e modelos de motores. Este pequeno grau de detalhamento é justificado pela diversidade de combinações de modelos que uma montadora é capaz montar, mesmo sendo o número real de combinações menos expressivo que os resultados dos cálculos teóricos apresentados na literatura (SCARVADA *et al.*, 2005), ainda sim é amplo suficiente para inviabilizar uma previsão confiável de opcionais em um horizonte de planejamento de longo prazo.

Por isso, as montadoras preparam, no médio prazo, um robusto plano de suprimento a fim de chamar atenção dos fornecedores para potenciais gargalos de capacidade. Outra razão para investir nas atividades de médio prazo é a complexidade logística: centenas de fornecedores diretos e milhares de componentes para gerenciar.

É necessário que a entrega de materiais do fornecedor na montadora seja coordenada. Por exemplo, componentes volumosos e/ou caros geralmente tem um método de abastecimento chamado *Just-in-time* (JIT), entregues no dia da montagem, e eventualmente *Sequence-in-line* (SIL), direto na linha de montagem seguindo a sequência exata da produção. Por esta razão, as requisições de materiais são enviadas aos fornecedores via EDI (*Electronic Data Interchange*) com o período exato para consumo.

Para a informação alcançar este nível de detalhamento é necessário gerar uma sequência não-dinâmica de carros a entrar na produção e as etapas que levam a este ponto, como o Planejamento Mestre da Produção, são cruciais. Por isso, planejadores de produção e planejadores de vendas são novamente envolvidos em um processo que deverá conceder mais qualidade à informação. Este processo é conhecido como *rolling horizon planning*, e as informações contidas nele variam entre 3 meses e 1 ano, porém somente as quatro primeiras semanas são colocadas em prática.

Conforme pode ser observado na Figura 3, a cada nova rodada de planejamento um novo período de produção vai sendo detalhado e também vai sendo adicionado um novo período à programação existente. Espera-se desta forma que grande parte do planejamento de médio prazo seja mantida como o original.

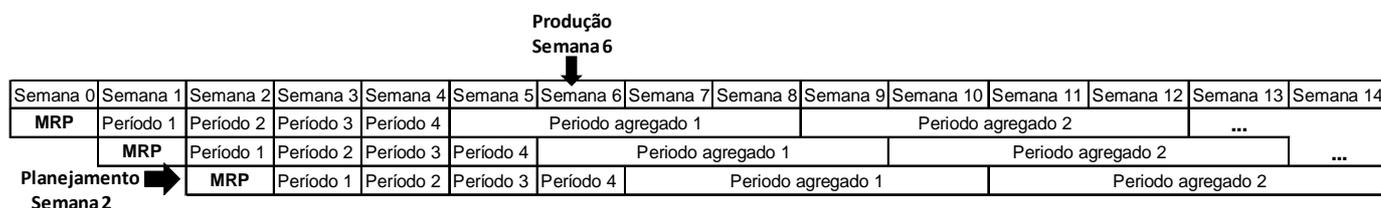


Figura 3 – Simulação do Planejamento Mestre da Produção

Para que as decisões sejam tomadas quanto ao sequenciamento, é necessário que todos os pedidos tenham sido completamente especificados (opcionais) pelos concessionários até uma data máxima estipulada pelo calendário do planejamento (varia entre 3-6 semanas antes do início do período de produção).

Admitindo que a planta, local onde serão produzidas as ordens do cliente, já tenha sido determinada em uma etapa anterior – pela atividade conhecida como *plant assignment*, as pessoas responsáveis pelo planejamento na planta alocada, diante da carteira completamente especificada, analisam se aceitam ou rejeitam as encomendas. É neste momento que a promessa de data de entrega do pedido ao cliente será determinada – atividade chamada de *order promising* (MEYR, 2004).

Na Figura 3 podemos observar também várias rodadas do processo descrito acima. Como exemplo, note que os pedidos a serem montados na semana 6 devem ser totalmente especificados e incluídos no planejamento mestre da produção ainda na semana 2.

Em um sistema de planejamento hierárquico, o sequenciamento detalhado da produção está subordinado ao planejamento mestre, responsável pela aceitação dos pedidos, determinação das datas de entrega e designação dos períodos de produção das mesmas (HINDI e PLOSZAJSKI, 1994; BOLAT, 2003).

Meyr (2004) expõe uma tendência que vem sendo adotada nessa fase do planejamento e, com certeza, é um desafio à maneira tradicional como a indústria automobilística tem trabalhado. Esta mudança representa uma transformação estratégica para diminuir o *lead time* de processamento do pedido até a entrega

(*order-to-delivery*): estamos falando do sistema *online ordering* ou sistema de pedidos *online* – implantado com êxito na indústria de informática.

Esta iniciativa visa o afastamento do planejamento hierárquico e simplificação do processo no qual os pedidos despenderiam dias dentro das diversas divisões de vendas/produção sujeitos a várias rodadas de tomada de decisão.

O sistema *online ordering* funciona baseado em um programa de computador que disponibiliza a especificação dos pedidos via internet e os envia diretamente a um sistema de processamento central, onde terão sua viabilidade técnica checada, uma planta determinada (*plant assignment*) e a data de entrega definida (*order promising*) através de critérios e procedimentos pré-determinados.

Porém, esta abordagem não pretende apenas automatizar a reserva dos pedidos, pois lidar com as solicitações requer uma alta habilidade de análise de cenários e capacidade de resposta. Este é o ponto onde a Pesquisa Operacional se apresenta como uma ferramenta promissora de suporte a decisões.

A partir deste ponto, um grupo de veículos idênticos será mencionado como uma configuração de veículo.

Hindi e Ploszajski (1994) apresentaram um modelo matemático que seleciona os pedidos a serem incluídos no plano mestre de produção, levando em consideração as cotas e metas de vendas a serem atingidas para cada mercado/configuração de veículo.

No modelo proposto pelos autores, cada pedido i é considerado parte de um grupo M de mercado/configuração de veículo e pertencendo a um conjunto de atributos K . Este último corresponde às restrições da manufatura.

Sejam os parâmetros do modelo:

N = conjunto de pedidos disponíveis na carteira, $i \in N$;

M = conjunto de mercados/configuração de veículo, $m \in M$;

K = conjunto de atributos, $k \in K$;

d_m = número desejado de pedidos a serem escolhidos, pertencendo a um mercado/configuração de veículo m ;

b_k = número máximo aceitável de pedidos escolhidos contendo o atributo k ;

$$\alpha_m^i = \begin{cases} 1, & \text{se o pedido } i \text{ pertencer ao mercado/configuração de veículo } m, \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

$$\beta_k^i = \begin{cases} 1, & \text{se o pedido } i \text{ contém o atributo } k, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

As variáveis do modelo são, $\forall i$, representadas por

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{se o pedido } i \text{ será escolhido} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

A formulação matemática do modelo é representada da seguinte forma:

$$\text{Max } \sum_i x_i \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_i \alpha_m^i x_i = d_m \quad \forall m \quad (2)$$

$$\sum_i \beta_k^i x_i \leq b_k \quad \forall k \quad (3)$$

$$x_i \in \{0,1\} \quad \forall i \quad (4)$$

As restrições em (2) garantem que o número de pedidos satisfaça o requisito mercado/configuração do veículo, enquanto as restrições em (3) garantem que os limites de recursos não sejam excedidos. Em (4), o tipo da variável de decisão é definido como binário.

Este modelo é interessante, pois considera os gargalos potenciais (materiais ou recursos de produção), no entanto a satisfação das restrições (2) desconsidera algumas particularidades da demanda e pode tornar o problema inviável diante de alguns cenários.

Vejamos as características da demanda por caminhões a fim de melhor contextualizar seu papel no modelo de seleção de pedidos e, também, no universo da indústria automobilística.

2.1.1.

Particularidades da demanda nas montadoras de caminhões

O comércio de caminhões é considerado um termômetro da economia, já que a maior parte das compras deste tipo de veículo é voltada para o transporte do que as fábricas entregam, da produção agrícola e da construção civil.

Portanto, é natural que a demanda por caminhões tenha determinantes bem diferentes dos veículos leves. Diferentemente desses, os veículos pesados são bens de capital, estando sujeitos a decisões de compra típicas do investimento produtivo, que não dependem, ao menos diretamente, da evolução da renda e da massa salarial. Além disso, há a interferência de políticas definidas nas três

esferas de governo e com variados escopos como transporte coletivo, segurança veicular, meio-ambiente etc. (CARVALHO e PINHO, 2009).

Especialmente no Brasil, o nível de produção é fortemente influenciado pela flutuação das vendas internas. Segundo o anuário 2012 da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea), em 2011 a relação de licenciamento de caminhões novos nacionais em relação à produção interna atingiu 80%. Na Figura 4, podemos verificar o histórico e o comportamento destas duas atividades.

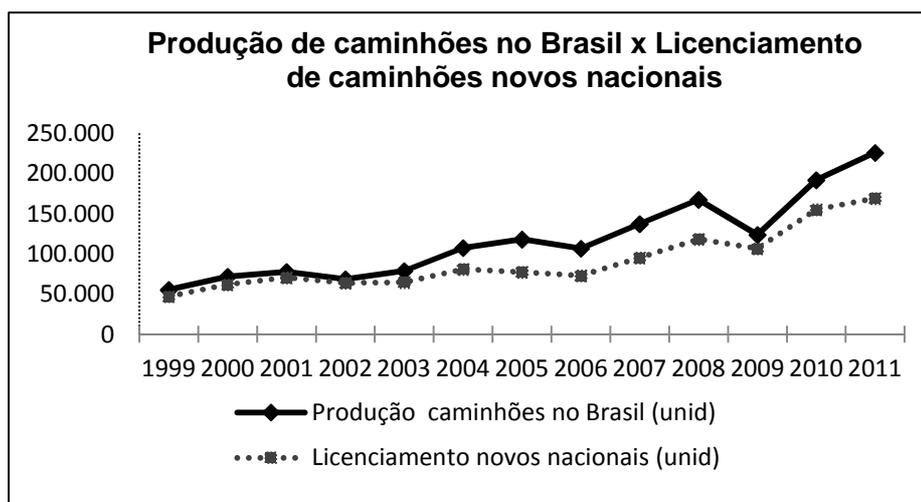


Figura 4 – Gráfico da evolução da produção e licenciamento de caminhões no Brasil
Fonte: Anuário Anfavea 2012

A relação entre produção e vendas internas se mostra especialmente relevante quando contemplamos, através do principal indicador de geração de riqueza do Brasil – Produto Interno Bruto (PIB) – a evolução da *performance* da economia nacional. O gráfico da Figura 5 reforça a imagem do caminhão como um bem de capital e expõe a necessidade, já mencionada anteriormente, de análise de cenários e capacidade de resposta dos fabricantes no gerenciamento da demanda e planejamento da produção.

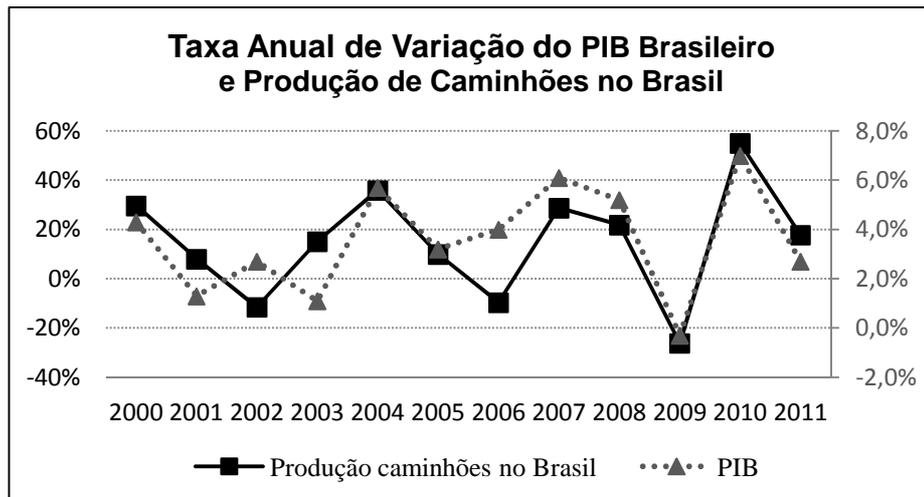


Figura 5 - Gráfico da variação da produção de caminhões no Brasil e PIB

Fontes: IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e Anfavea

Notadamente, observa-se um movimento atípico em 2009 que ilustra as consequências da crise econômica mundial no país: o recuo do PIB nesta ocasião foi de -0,3%, enquanto que a produção de caminhões caiu -26%. Entretanto, o mais interessante foi a abrupta recuperação dos dois indicadores logo no ano seguinte.

Diante desta variabilidade da demanda, conclui-se que quanto mais tarde for feita a seleção de pedidos a serem manufaturados melhor seria, pois as informações advindas do departamento de vendas estariam o mais atualizado possível. Por outro lado, esta atividade também deveria ser feita o mais cedo possível para que houvesse tempo suficiente de fabricar, ou comprar, todos os componentes básicos, pois alguns têm longo *lead time* (HINDI e PLOSZAJSKI, 1994).

Atrelando-se esses fatos às características de um ambiente *assembly-to-order*, um modelo matemático que se propõe a selecionar pedidos para incluí-los no plano mestre da produção não deveria somente considerar a “aceitação de pedidos” de acordo com a cota negociada para cada mercado. Há também de ser capaz de adiantar pedidos, em um cenário de baixa demanda, ou ainda sugerir atrasos quando os pedidos superarem a capacidade disponível, e assim contribuir com as interações dos vários agentes dentro da cadeia de suprimentos.

2.2. Sequenciamento em linhas de montagem de modelos mistos

As várias abordagens da literatura sobre balanceamento e sequenciamento em linhas de montagem de modelo misto (*mixed-model assembly line*) se diferem principalmente em relação aos seus objetivos.

Boysen *et al.* (2007) classificaram estas abordagens da seguinte forma:

- a) Sequenciamento de modelos mistos (*Mixed-model sequencing*): Esta abordagem foi introduzida por Wester e Kilbridge (1964) e pretende alocar tarefas às estações em uma determinada sequência, levando explicitamente em consideração: as relações de precedência das atividades, tempos de operação, movimentos do operador, característica de cada posto de trabalho, além de outras características operacionais da linha de montagem. Na literatura, aparecem dois principais objetivos: minimizar o número de postos de trabalho ao longo da linha ou ainda, partindo de um número fixo de postos, minimizar as sobrecargas em cada estação de trabalho. Veja o exemplo de um modelo básico a seguir.

Notação dos parâmetros:

M = número de configuração de veículos, $m = 1, 2, \dots, M$;

Z = número de ciclos de produção, $s = 1, \dots, Z$;

K = número de estações, $k = 1, \dots, K$;

d_m = demanda pela configuração de veículo m ;

p_m^k = tempo de processamento da configuração de veículo m na estação k

(em minutos);

tk = tempo de ciclo ou *takt time* em minutos;

l_k = extensão da estação k (em minutos).

Notação das variáveis de decisão:

$x_m^s = \begin{cases} 1, & \text{se a configuração } m \text{ será produzida no ciclo } s, \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$

w_k^s = representa a sobrecarga de trabalho que ocorre na estação k quando a s -ésima unidade é processada, variável contínua;

s_k^k = representa a posição do operador na estação k quando o tempo de ciclo (tk) começa, variável contínua representada em unidade de tempo (minutos).

Formalização do modelo matemático similar ao proposto pelos autores YANO e RACHAMADUGU, 1991:

$$\text{Min } \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^Z w_k^s \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{m=1}^M x_m^s \leq 1 \quad \forall s \quad (2)$$

$$\sum_{s=1}^Z x_m^s = d_m \quad \forall m \in M \quad (3)$$

$$s_{s+1}^k \geq s_s^k + \sum_{m \in M} p_m^k x_m^s - w_k^s - tkt \quad \forall k, \forall s \quad (4)$$

$$s_s^k + \sum_{m \in M} p_m^k x_m^s - w_k^s \leq l_k \quad \forall k, \forall s \quad (5)$$

$$s_s^k \geq 0; w_k^s \geq 0 \quad \forall s, \forall m, \forall k \quad (6)$$

$$s_1^k = 0 \quad \forall k \quad (7)$$

$$x_m^s \in \{1,0\} \quad (8)$$

A função objetivo a ser minimizada (1) representa o valor total de sobrecarga de trabalho. A equação em (2) restringe que no máximo uma configuração m entre no ciclo de produção s . As restrições em (3) asseguram a satisfação da demanda. As restrições em (4) garantem que o processamento do carro no ciclo $s+1$ dentro da estação k não pode começar antes desta estação ter concluído o carro anterior, no ciclo s . Já as restrições em (5) restringem o trabalho à fronteira da estação, enquanto que as restrições em (6) impõem a não-negatividade para s_s^k e w_k^s . As equações em (7) tratam dos operadores estarem em estado inicial no primeiro ciclo s ($s_1^k = 0$). Em (8) x_m^s é definida como sendo uma variável binária.

b) *Level scheduling*: Enquanto a abordagem anterior tem por objetivo minimizar o excesso de carga de trabalho, *level scheduling* procura alinhar o sequenciamento com a filosofia *Just-In-Time* (JIT). Um importante requisito para o abastecimento-JIT (como indicado em Joo e Wilhelm, 1993; Bautista, *et al.*, 1996a,b *apud* Boysen *et al.*, 2007) é manter a taxa de demanda pelos materiais estáveis ao longo do tempo. Como diferentes modelos requisitam diferentes produtos e componentes, influenciando diretamente o deslocamento de material, um sequenciamento da produção que minimiza os desvios entre a taxa real de requisição de material e a taxa

ideal é almejado. Esta abordagem foi introduzida por Miltenburg (1989) e seu modelo básico é apresentado a seguir.

Acrescentam-se à notação do modelo visto anteriormente os seguintes parâmetros e variáveis de decisão:

P = número de peças (material), $p = 1, 2, \dots, P$;

a_m^p = demanda por peças p em uma configuração m ;

r_p = taxa ideal de consumo da peça p , sendo $r_p = (\sum_m a_m^p d_m) / Z$;

y_m^s = variável inteira que representa a quantidade de produção acumulada de um veículo de configuração m até o ciclo s .

Formalização do modelo:

$$\text{Min } \sum_{s=1}^Z \sum_{p=1}^P (\sum_{m=1}^M a_m^p y_m^s - s r_p)^2 \quad (9)$$

sujeito às restrições (2), (3), (8) e:

$$y_m^s = \sum_{s'=1}^s x_m^{s'} \quad \forall s \quad (10)$$

$$y_m^s \in \mathbb{Z}_+ \quad (11)$$

A função objetivo (9) a ser minimizada representa a soma total de desvios entre taxa real e taxa ideal da demanda cumulativa por ciclo s de produção e peça p . As restrições em (10) determinam a demanda cumulativa da variável binária x_m^s , enquanto em (11) y_m^s é definida como sendo uma variável inteira.

c) *Car sequencing problem* (Problema de sequenciamento de carros): Parrello e Kabat (1986) foram os pioneiros desta abordagem, cujas regras formuladas são do tipo $p_o:q_o$, ou seja, em q_o sucessivos modelos, somente p_o carros poderiam conter o componente o . Essas regras de sequenciamento são atreladas a alguns componentes especiais a fim de minimizar o tempo de conclusão das tarefas em cada estação de trabalho. Logo, a alusão ao excesso de carga de trabalho é feita de maneira implícita, sendo menor a sobrecarga quanto menos regras forem violadas;

As três abordagens provaram ser de grande importância para a indústria, e não é incomum encontrar na literatura modelos híbridos desenvolvidos para alcançar metas de mais de um enfoque simultaneamente.

No entanto, abordagens como *mixed-model sequencing* e *level scheduling*, na prática requerem uma extensa coleta de dados devido ao nível de detalhamento e numerosa quantidade de atividades e peças que a indústria automotiva lida em seu dia-a-dia. Segundo Boysen *et al.* (2007), o problema de sequenciamento de carros tem recebido, recentemente, ampla atenção da comunidade acadêmica devido a sua relevância prática. Esta atenção pode ser facilmente verificada ao observarmos o número de artigos publicados em revistas e periódicos acadêmicos ao longo do tempo. Na Figura 6, apresenta-se o que foi identificado na base de dados internacional *Scopus*.



Figura 6 – Gráfico da evolução de publicações acadêmicas sobre o PSC

Fonte: Base de Dados *Scopus*, consulta em Novembro de 2012

Diante deste gráfico, além de 1986, o ano da primeira publicação por Parrello e Kabat, outro ano se destaca: 2008. O nítido aumento no número de publicações pode ser naturalmente compreendido a luz do desafio promovido, em 2005, pela Sociedade Francesa de Pesquisa Operacional (ROADEF) em parceria com a montadora Renault.

A seguir, na subseção 2.2.1, o problema de sequenciamento de carros será apresentado em maiores detalhes e em seguida, na subseção 2.2.1.1, serão destacados alguns aspectos da ROADEF 2005 e sua influência neste trabalho.

2.2.1.

O problema de sequenciamento de carros

O problema de sequenciamento de carros (PSC) consiste em determinar a ordem na qual os automóveis deveriam ser produzidos, levando em consideração várias opções de modelo, restrições da própria linha de montagem e as metas de um ambiente de produção.

As primeiras regras de sequenciamento preconizavam uma estação de trabalho definida para dois tipos de veículos: ou o operador instalaria um opcional (por exemplo, CD *player*, *airbags*, vidros elétricos, etc) e isto criaria uma pesada carga de trabalho, ou o operador não instalaria este opcional no veículo e uma baixa carga de trabalho seria observada (PARRELLO e KABAT, 1986).

Considere a Figura 7 representando uma sequência com 4 veículos. Há dois opcionais distintos, o opcional “+” e o opcional “X”, cujos critérios de espaçamento $p_o:q_o$ são $1/2$ e $2/4$, respectivamente. O escalonamento apresentado viola o espaçamento do opcional “+”, porém observe que não viola o espaçamento do opcional “X”, não sendo as duas razões equivalentes (apesar de proporcionais).

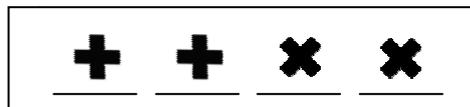


Figura 7 – Representação da ocorrência de opcionais na linha de produção

A formulação proposta a seguir modela matematicamente o PSC como um problema de satisfação de restrições ou de viabilidade.

Notação dos parâmetros

Z = número total de veículos a serem sequenciados, $s = 1, \dots, Z$;

M = número de configurações de veículos, $m=1, 2, \dots, M$;

O = número de opcionais disponíveis, $o = 1, 2, \dots, O$;

d_m = demanda pela configuração m ;

$u_o^m = \begin{cases} 1, & \text{se a configuração } m \text{ contém o opcional } o \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$

p_o/q_o = a ocorrência do opcional o deve ser de no máximo p a cada q seqüências consecutivas ($1 \leq p_o \leq q_o$).

Sejam as variáveis de decisão a seguir:

$x_s^m = \begin{cases} 1, & \text{se o modelo } m \text{ foi escalonado na seqüência } s \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$

O problema de viabilidade é formalizado por:

$$\sum_s x_s^m = d_m \quad \forall m = 1, \dots, M \quad (1)$$

$$\sum_m x_s^m = 1 \quad \forall s = 1, \dots, Z \quad (2)$$

$$\sum_{s'=s}^{s+q_o-1} \sum_m x_s^m u_o^m \leq p_o \quad \forall o = 1, \dots, O; s = 1, \dots, Z \quad (3.1)$$

$$x_s^m \in \{0,1\} \quad \forall m \forall s \quad (4)$$

As equações em (1) exigem que a demanda por cada modelo m seja satisfeita. As restrições em (2) garantem que cada sequência disponível na linha de montagem seja preenchida. As restrições (3.1) se encarregam de restringir a quantidade de opcional o presente em um intervalo de sequências de tamanho q_o , enquanto que em (4) as variáveis do problema são definidas como binárias.

Devido à diversidade de veículos montados atualmente e tendência da indústria para a produção orientada pela demanda, não se pode garantir que exista um escalonamento que respeite todas as restrições de espaçamento, como sugerido em (3.1). Neste caso, parece mais adequado ao invés do uso de restrição de satisfação da capacidade de opcionais, usar um modelo de otimização que procure minimizar a violação das regras de espaçamento.

Esse modelo deve considerar ainda um operador capaz de instalar várias opções diferentes – variantes de uma mesma opção (por exemplo, diferentes especificação de motores) ou o mesmo opcional em diferentes quantidades (*airbag* somente do lado do motorista ou de ambos os lados) – o que confere complexidade ao problema.

Lesert *et al.* (2011) afirmam que atualmente o desafio implica em criar uma sequência de carros equilibrada de tal modo que os veículos m , cuja duração t de operação na estação de trabalho k é maior que o *takt time* ($t_k^m > tkt$), estejam distantes uns dos outros através da inserção de um número suficiente de veículos com $t_k^m < tkt$.

Espera-se que os critérios de espaçamento $p_o:q_o$ sejam capazes de representar e forçar o distanciamento entre os veículos $t_k^m > tkt$ (para um estudo que quantifica a capacidade de representação destes critérios, veja LESERT *et al.*, 2011). Neste panorama definir o método de contabilização das violações é importante.

O método amplamente utilizado é chamado *sliding window* (janela deslizante), sendo sua formulação semelhante a restrição (3.1) escrita anteriormente. Esta técnica implica em adicionar uma variável que irá contabilizar o número de violações da restrição de espaçamento do opcional o a partir da sequência s (θ_s^o):

$$\sum_{s'=s}^{s+q_o-1} \sum_m x_{s'}^m u_o^m - p_o \leq \theta_s^o \quad \forall o; \forall s = 1, \dots, Z \tag{3.2}$$

$$\theta_s^o \geq 0 \tag{5}$$

Esta variável θ_s^o tem como função introduzir uma penalidade na função objetivo, $\text{Min} \sum_o \sum_s \theta_s^o$.

Na Figura 8, apresenta-se o esquema de contabilidade de violações do opcional “+”, cujo critério de espaçamento é dado por $p_o/q_o = 1/2$.

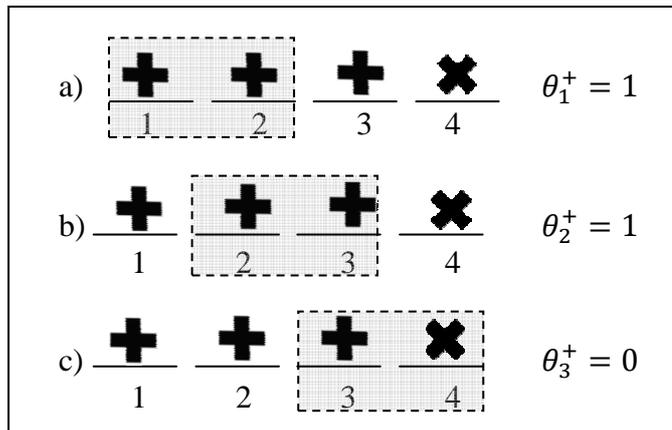


Figura 8 – Representação da contabilização de violação do opcional “+”

Gravel *et al.* (2005) observaram em seu trabalho sobre a ocorrência de dupla contagem das violações que esta técnica provoca, dependendo do local de sua ocorrência na sequência. Após esta observação, foram desenvolvidas por Gagné *et al.* (2006) e aperfeiçoadas por Flidner e Boysen (2008) diferentes propostas que contam o número de posições onde as violações ocorrem (e não o número de violações ocorridas).

Apesar de as restrições de espaçamento serem o grande foco deste assunto, há outro elemento importante que se apresenta fora da linha de montagem final, porém influenciando diretamente na solução do problema: são os requisitos de pintura.

A cor pode ser entendida como um opcional de escolha obrigatória, pois é o cliente quem o determina no momento da compra. Para o ambiente de produção a

diversidade de opções implica que, a cada mudança de cor, solventes serão usados para lavar as pistolas de aplicação e não contaminar a cor seguinte. Ou seja, minimizar custos de mudança de cor e consumo de poluente significa escalonar, o máximo possível, cores iguais de maneira sucessiva.

Uma opção de tradução desta realidade para dentro do modelo matemático do PSC é a inserção de uma nova parcela à função objetivo que irá contabilizar o número total de mudanças de cores no escalonamento proposto.

O impacto deste novo elemento será visto, a seguir, dentro do contexto da ROADEF 2005.

2.2.1.1. ROADEF 2005 e o desafio Renault

O concurso organizado pela ROADEF, com apoio da montadora Renault, consistiu em convocar a comunidade acadêmica a desenvolver algoritmos capazes de resolver o problema de sequenciamento de carros em escala industrial.

O desafio tornou o já conhecido PSC em um problema de decisão multi-objetivo ao apresentar o contexto diário de programação da produção para além da linha de montagem final, incluindo a preocupação com as mudanças de cores da planta de pintura. Até, então, instâncias largamente utilizadas para testes e comparações de algoritmos solucionadores do sequenciamento de carros não consideravam esta questão – por exemplo, a CSPlib publicada inicialmente por Gent e Walsh (1999).

Além disso, as próprias instâncias utilizadas como *benchmarking* no concurso trouxeram características mais realistas sobre a desafiadora realidade enfrentada pelas montadoras. Enquanto, as instâncias do desafio continham até 1300 carros, as instâncias disponíveis em CSPlib, por exemplo, compõe até 200 carros. Veja a Tabela 1:

Tabela 1 - de instâncias populares disponíveis na literatura

	Nº Instâncias	Nº Carros	Nº opcionais	Nº cores	Nº configurações
ROADEF A	16	334 a 1314	6 a 22	11 a 24	36 a 287
ROADEF B	45	65 a 1270	4 a 25	4 a 20	11 a 339
ROADEF X	19	65 a 1319	5 a 26	5 a 20	10 a 328
CSPlib Lee	70	200	5	-	17 a 30
CSPlib Gent	9	100	5	-	19 a 26

Fonte: baseado em SOLNON *e. al.* (2008)

No entanto, antes dessas questões Kis (2004) já havia apresentado uma prova de que o PSC, típico problema de otimização combinatória, é um problema fortemente NP-difícil (*strongly NP-hard*), ou seja, é um problema que exige um grande esforço computacional para encontrar uma solução aproximadamente ótima à medida que o tamanho da instância cresce.

Solnon *et al.* (2008) apontam que a dificuldade de uma instância PSC depende do tamanho do seu espaço de busca, composto por todas as possibilidades de permutação dos veículos a serem montados. Assim, se o universo de carros V é dividido em m configurações de veículos, o número de diferentes arranjos é dado por $\frac{|V|!}{|V_1|!|V_2|!\dots|V_m|!}$.

A taxa de utilização dos opcionais também é apontada como um complicador. Ela consiste na razão entre o número de carros que de fato contém o opcional o e o número total de carros que poderiam contê-lo e ainda satisfariam a restrição de espaçamento. Representando esta descrição de acordo com o último modelo apresentado na subseção 2.2.1, temos $tx_o = \frac{\sum_s \sum_m x_s^m u_o^m}{\binom{p_o}{q_o} Z} \forall o$.

Pode-se concluir: a) uma taxa perto de 1 significa que a demanda está próxima da capacidade; b) mais restritiva e difícil será a satisfação das restrições de espaçamento de opcionais quanto maior for q_o e/ou menor for p_o .

Na Tabela 2 são apresentados dados de algumas razões de espaçamento indicadas na literatura.

Tabela 2 - Comparação entre regras de espaçamento

	Taxas p/q
ROADEF X (instancia 048_1)	1/(2,4,5,8,9,30,10,100) 2/3 4/9
CSPlib formulada por Gent	1/(2,3,5) 2/(3,5)

Fonte: baseado em SOLNON *et al.* (2008)

Diante destas considerações fica claro que antes da ROADEF 2005, as pesquisas acadêmicas estavam um pouco distantes da aplicação industrial do problema. O concurso, conforme ilustrado pela Figura 6, serviu de incentivo para que a literatura existente fosse exaustivamente estudada e houvesse um avanço no desenvolvimento de algoritmos e exposição de novos *insights* sobre o assunto.

Quanto aos resultados apresentados pelas equipes, pode-se concluir que foi satisfatório, uma vez que, além dos avanços no campo acadêmico, a própria montadora Renault implantou o algoritmo “vencedor” em todas as suas plantas de produção em meados de 2006.

Este trabalho, por sua vez, não tem objetivo de apresentar contribuições quanto ao desenvolvimento de algoritmos, porém não poderia deixar de referenciar este acontecimento, afinal, ele elucida o que este trabalho pretende alcançar: o enfoque prático de um modelo como suporte à tomada de decisão.

Referenciamos, portanto para conhecimento dos métodos usados no contexto da ROADEF, Solnon *et al.* 2008; para mais detalhes sobre os trabalhos vencedores da competição ver Estellon *et al.* (2006), Estellon *et al.* (2008), Rocha (2005); para descrição completa das condições e critérios delineadores do desafio indicamos o próprio site da ROADEF; e, finalmente, para prova sobre a complexidade dos problemas de sequenciamento de carro examinar Kis (2004).