

Sistemas de Informação para o escalonamento automático e otimizado da produção: um estudo sobre a Indústria Portuguesa

Pedro Fernandes ¹, Carla Sofia Pereira ², Armando Barbosa ³

1) Bullet Solutions, Porto, Portugal
pedro.fernandes@bulletsolutions.com

2) CIICESI-ESTGF, Instituto Politécnico do Porto, Felgueiras, Portugal
carla.pereira@eu.ipp.pt

3) Bullet Solutions, Porto, Portugal
armando.barbosa@bulletsolutions.com

Resumo

Atualmente, a esmagadora maioria das empresas industriais portuguesas continua a gerir o escalonamento da produção de um modo manual. Fazendo uso de largos anos de experiência, os responsáveis pela produção tentam minimizar o impacto de terem de definir a sequência ideal de operações de fabrico sem o suporte de uma ferramenta de apoio à decisão. No entanto, esta é apenas uma solução de recurso. Se este processo pudesse ser calculado de forma automática e otimizada, os resultados alcançados seriam substancialmente melhores. No estudo realizado e que é apresentado de um modo resumido neste artigo, pretendeu-se efetuar uma análise da situação atual da indústria portuguesa, com o objetivo de especificar e construir um modelo que servisse de base para o desenvolvimento de um Sistema de Informação, que fosse de encontro às necessidades reais existentes.

Palavras-chave: Escalonamento da produção, Indústria, Otimização

1. Introdução

O escalonamento da produção é um problema de otimização combinatória de resolução complexa, mesmo para casos de pequena dimensão [Jain e Meeran 1999]. O número de soluções possíveis, ou seja, de sequências de produção válidas, é demasiado grande para que de um modo simples e rápido se encontre uma solução de boa qualidade. Para além disso, a qualidade da solução obtida está fortemente condicionada pelas decisões tomadas ao longo da sua construção como, por exemplo, optar-se num dado momento por iniciar a tarefa A, quando na realidade o melhor teria sido escolher a B.

Atualmente, os responsáveis pela produção fazem uso de anos de experiência de trabalho, tentando reduzir o impacto negativo de terem de produzir manualmente uma sequência de operações de fabrico. No entanto, esta é apenas uma solução de recurso e se este processo pudesse ser calculado de forma automática e otimizada, os resultados alcançados seriam substancialmente melhores.

Um bom escalonamento da produção permite um aumento das quantidades produzidas, uma maior ocupação das máquinas, a redução dos *stocks*, tempos de entrega inferiores e sem atrasos, a diminuição de tempos de configuração das máquinas, um menor tempo de espera dos produtos entre operações, a redução dos tempos totais de produção, a diminuição da necessidade de subcontratação e a diminuição da necessidade de horas extra. Uma correta noção do que é realmente possível produzir traz um aumento da capacidade negocial, um melhor tempo de reação a alterações inesperadas (avarias, alterações de encomendas, entre outros) e grandes ganhos financeiros. É no chão de fábrica e no sequenciamento das operações de fabrico que se conseguem obter as respostas a perguntas importantes como, por exemplo, "quanto consigo realmente produzir?", ou "é possível cumprir um determinado conjunto de prazos de entrega?".

O escalonamento da produção é estudado, há algumas dezenas de anos, pela comunidade científica e pela área da Investigação Operacional em particular. Qualquer pesquisa sobre este tema resulta facilmente em centenas de publicações, abordando as mais diversas tipologias de indústria, tipo de produção, profundidade e foco de análise [Jain e Meeran 1999], [Ouelhadj e Petrovic 2009]. A razão deste interesse prende-se, em primeiro lugar, com o impacto que o escalonamento pode ter nos resultados económicos das unidades produtivas, isto porque, com pequenas melhorias no sequenciamento da produção, podem ser originados ganhos de milhares de euros. Por outro lado, a grande diversidade de cenários existentes potencia os campos de investigação e as respetivas direções de pesquisa.

Apesar do interesse académico das abordagens encontradas, que permitem, sem dúvida, analisar o comportamento de alguns métodos de resolução do problema em ambientes controlados, a passagem para uma aplicação prática desses conceitos torna-se impossível, uma vez que a realidade é muito mais complexa. A modelação de um caso específico e limitado pode ser realizada com alguma facilidade. O grande problema passa por conseguir identificar e modelar todas as possibilidades, construindo um modelo único de tratamento do problema. Há, assim, um enorme espaço para melhorias e para produtos realmente otimizados que possam introduzir avanços significativos nos processos de fabrico.

Neste estudo pretendeu-se efetuar uma análise da situação atual da indústria portuguesa, com o objetivo de construir um modelo que servisse de base para o desenvolvimento de um Sistema de Informação, que fosse de encontro às necessidades reais existentes. Ao longo deste artigo são descritos os principais resultados do trabalho de análise e especificação de uma ferramenta informática de escalonamento automático e otimizado da produção.

2. Estado da arte

Desde os anos 60 do século passado existem ferramentas de apoio à produção. MRP, MRPII, ERP, até aos mais recentes APS, são algumas siglas familiares nesta área. No entanto, cada um destes sistemas está vocacionado para o fim com que foi desenvolvido e não para o escalonamento da produção.

Apesar da complexidade do problema e da inerente dificuldade de modelação, podem ser encontradas algumas ferramentas de escalonamento da produção de diferente qualidade, preço e utilidade. Eliminando as soluções não automáticas ou não otimizadas e os sistemas mais abrangentes de gestão (que não estão minimamente preparados para um escalonamento fino da produção), podem-se destacar algumas ferramentas, como o *Izaro Gray* ou o *PHC Manufactor*, bem como dois dos mais referenciados produtos à escala global, o *Preactor* e o *Asprova*.

Na indústria existem variadíssimos tipos de sistemas de produção em operação, sendo que, para alguns deles, a elaboração de um plano de escalonamento eficaz é mais simples do que para outros. O número de máquinas disponíveis, a variabilidade dos trabalhos a executar, os objetivos a atingir ou a existência de imprevisibilidade na ocorrência de certos acontecimentos, são apenas alguns exemplos de situações reais que contribuem para um elevado número de cenários distintos. Desde os mais simples e meramente teóricos sistemas de uma máquina, passando por sistemas de máquinas paralelas, até aos mais complexos *open shop*, *flow shop* e *job shop*, utilizando conjuntos mais ou menos completos de restrições e objetivos, são várias as tipologias estudadas [Pinedo 2012], [Brucker 2007].

Apesar desta diversidade, a esmagadora maioria das situações reais existentes na indústria estão incluídas na categoria dos problemas *job shop* e suas variantes [Brucker e Knust 2012], sendo estes os problemas de escalonamento da produção que, ao longo dos anos, têm suscitado maior interesse na comunidade científica [Jain e Meeran 1999].

Nos sistemas *job shop* existe uma grande variabilidade de produtos, mas apenas um limitado conjunto deles é produzido em cada momento. As rotas de processamento dos trabalhos são conhecidas, mas não são necessariamente as mesmas para todos os trabalhos. São problemas normalmente muito complexos, sendo poucos os que podem ser resolvidos em tempo polinomial [Brucker 2007].

De acordo com [Vieira et al. 2003], existem dois tipos de ambientes de escalonamento na produção: os estáticos e os dinâmicos. Grande parte da pesquisa na área tem sido desenvolvida no sentido de encontrar as melhores soluções para modelos estáticos. Estudos aprofundados dos escalonamentos estáticos, podem ser encontrados em [Pinedo 2012]. Apesar de haver estudos exaustivos para estes sistemas, na realidade quase todos os sistemas de produção na indústria operam em ambientes dinâmicos [Ouelhadj e Petrovic 2009]. Dentro dos sistemas dinâmicos, existem os casos em que há variabilidade tanto na chegada de trabalhos como no fluxo de processamento dos mesmos.

Os *job shop* são casos típicos de sistemas que operam neste tipo de ambiente.

Ao longo dos tempos têm sido desenvolvidos e estudados variadíssimos métodos de resolução do problema. Estes métodos podem ser exatos ou de aproximação. Os métodos exatos são aqueles que encontram sempre soluções ótimas explorando o universo de soluções possíveis para o problema, encontrando a que cumpre melhor os objetivos. No entanto, à medida que a dimensão do problema aumenta, aumenta também o número de soluções possíveis, pelo que, para a maioria dos casos, estes métodos não têm aplicação real. Os métodos de aproximação conseguem dar resposta a problemas de elevada dimensão. Não garantem que a solução encontrada seja a ótima, mas encontram soluções satisfatórias, num intervalo de tempo considerado razoável. São, por isso, os métodos que têm efetivamente aplicação prática na maioria dos casos reais. No caso dos problemas *job shop*, estes enquadram-se na categoria dos problemas complexos quando o número de máquinas e o número de trabalhos é superior a dois [Jain e Meeran 1999].

Do conjunto de métodos exatos são de salientar os *branch and bound* [Brucker et al. 1994]. Quanto aos métodos de aproximação, existe um elevado número de técnicas distintas. Desde as mais básicas regras de despacho [Dominic et al. 2004], passando por métodos heurísticos [Lopez e Roubellat 2008] como o *simulated annealing* [Laarhoven et al. 1992], a pesquisa tabu [Geyik e Cedimoglu 2004] (considerada por muitos como uma das abordagens mais eficazes na geração de soluções de elevada qualidade para o problema *job shop* [Watson et al. 2005]), os algoritmos genéticos [Bierwirth e Mattfeld 1999], ou métodos híbridos [Zhang e Wu 2010].

Não é fácil determinar qual o melhor método a aplicar. Os diferentes métodos lidam à sua maneira com o problema, ou seja, têm uma forma característica de o tentar resolver. Contudo, é tido como praticamente certo que os métodos heurísticos são os únicos que produzem soluções satisfatórias para a maioria dos problemas de otimização combinatória de elevada dimensão [Lopez e Roubellat 2008].

3. Abordagem e métodos de recolha de dados

Na área dos Sistemas de Informação, existe uma grande variedade de métodos de investigação disponíveis, estando a escolha de um método ou combinação de métodos dependente do problema em estudo. Numa perspetiva de resolução de problemas, seguindo os princípios da *design science research* [Hevner et al. 2004] - "*The design-science seeks to extend the boundaries of human and organizational capabilities by creating new and innovative artifacts... In the design-science paradigm, knowledge and understanding of a problem domain are achieved in the building and application of the designed artifact*" - pretendeu-se, com este estudo, efetuar uma abordagem geral a diversos tipos de indústria com o intuito de construir um modelo global que se conseguisse adaptar às diferentes necessidades existentes.

Os estudos académicos fazem uma abordagem restrita do problema: consideram apenas uma parte do problema (sem um conjunto completo de restrições e objetivos) ou um tipo de

problema. Assim, com o objetivo de analisar e especificar um Sistema de Informação para o escalonamento automático e otimizado da produção, começou-se por fazer uma modelação da indústria portuguesa.

A melhor abordagem para conseguir compreender e resolver um problema é observá-lo na prática, tentar absorver todas as variáveis envolvidas, de modo a conseguir ter uma percepção clara do mesmo. Não adianta encontrar uma excelente solução para um problema que não existe ou que não foi compreendido em toda a sua dimensão. Desse modo, apenas com uma análise no terreno, tendo como base científica os princípios da *design-science* aplicados ao desenvolvimento de Sistemas de Informação, conseguimos ter uma visão clara do que existe atualmente e do que se pretende para o futuro, garantindo disciplina, rigor e transparência.

No estudo efetuado procurou-se abordar duas vertentes distintas: na primeira, o objetivo passou por conseguir ter uma visão geral de alto nível do problema; na segunda, o objetivo passou por identificar as situações mais relevantes que se encontram no chão de fábrica.

Para a primeira vertente (visão geral do problema), foram definidos 7 critérios chave de análise:

- 1) Modo de criação do escalonamento, podendo ser manual (papel; Excel ou ferramentas equivalentes; ferramentas desenvolvidas internamente; ajudantes gráficos) ou automático (ferramentas de cálculo automáticas de escalonamento da produção);
- 2) Divisão da criação do escalonamento, podendo ser total (escalonamento para toda a fábrica em simultâneo, sendo o tratamento centralizado) ou parcial (escalonamento dividido por “grupos” que criam o escalonamento apenas para o seu sector);
- 3) Tempo gasto na criação do escalonamento;
- 4) Tipo de produção (quantidade e diversidade das encomendas, ou seja, compreender o comportamento dos clientes e o impacto deste comportamento no modo de gerir a produção);
- 5) Principais dificuldades que são enfrentadas ao criar um escalonamento;
- 6) Robustez dos escalonamentos criados e necessidade de alterações posteriores;
- 7) Qualidade da informação existente e dos Sistemas de Informação utilizados.

Para a segunda vertente (identificação das situações mais relevantes), procurou-se efetuar o levantamento dos principais fatores com impacto na criação do escalonamento da produção. O trabalho acabou por ser um misto entre a validação de informação referenciada na literatura e nova informação fornecida pelos interlocutores.

O levantamento de requisitos foi efetuado em diferentes passos. Uma primeira fase, de entrevistas e reuniões com as empresas, que serviu para compreender de um modo geral o tipo de negócio em questão, as principais dificuldades do dia-a-dia, o estado de desenvolvimento atual e as expectativas futuras. Uma segunda fase, de visitas guiadas às fábricas, onde foi possível compreender todos os fluxos existentes, todas as variáveis envolvidas, ouvindo dos

responsáveis pela produção todas as especificidades do negócio. Uma terceira fase, de questões mais concretas sobre as duas fases anteriores, de modo a confirmar toda a informação recolhida.

O número de intervenções em cada empresa, em cada uma das fases, foi bastante variável (entre duas e oito visitas), tendo dependido principalmente do grau de complexidade de cada caso. Foram estudados cerca de duas dezenas de casos, dos mais diversos pontos do país (Norte, Centro e Sul), de várias dimensões (pequenas, médias e grandes empresas), de sectores como metalomecânica, têxtil, alimentar, vestuário, papel, cortiça, automóvel, eletrónica, moldes, entre outros. O objetivo foi ter um conjunto de casos de estudo o mais abrangente e diversificado possível, tendo sido esse o critério principal na seleção das empresas participantes.

4. Principais resultados da análise de requisitos

A. A situação atual da indústria portuguesa: visão geral

A esmagadora maioria das empresas industriais portuguesas continua a gerir o escalonamento da produção de um modo manual, seja em papel, com ferramentas básicas como o Excel, apoiado em ferramentas desenvolvidas internamente ou através de ajudantes gráficos. O grande problema está à vista porque, para além da falha evidente de não existir uma solução otimizada, todas as alterações são feitas com um enorme esforço, com a necessidade de atualização da informação em diversos locais, sendo esta atuação propícia à ocorrência de erros (no caso do papel ou do Excel). No caso das ferramentas internas ou dos ajudantes gráficos, a informação

está centralizada, permitindo uma gestão das alterações mais rápida, mas o problema da criação do escalonamento em si continua a existir, uma vez que a construção é manual. Em nenhuma das empresas estudadas é utilizada, atualmente, qualquer ferramenta automática de escalonamento da produção.

Numa outra vertente, foi possível perceber que, numa grande parte dos casos analisados, o escalonamento é dividido dentro da fábrica, ou seja, há “grupos” que são tratados de um modo separado. A necessidade de partir o problema em pequenas partes é a prova da complexidade existente (dificuldade em conseguir gerir o problema como um todo), mas cria outros inconvenientes, uma vez que o que é ótimo para um determinado sector pode ser péssimo para o seguinte que está à espera de receber um determinado *input* (que para si seria ótimo), mas acaba por receber outro (o *output* do sector anterior, que foi construído de um modo ótimo localmente, mas que na realidade não o é para o sector seguinte).

O tempo gasto com a tarefa de produzir o escalonamento da produção é muito variável (desde algumas horas para definir um plano semanal, até vários dias para obter um plano mensal) mas, independentemente desse tempo, foi unânime que uma ferramenta automática e otimizada de cálculo produziria melhores resultados finais, traria uma enorme flexibilidade e permitiria um apoio fundamental à decisão.

Os interlocutores da maior parte das empresas analisadas validaram um outro ponto

fundamental da realidade da indústria atual: cada vez mais são pedidas pequenas quantidades e muita diversidade. O crescimento do número de produtos a produzir tornou o controlo do escalonamento da produção uma tarefa cada vez mais complexa de efetuar. A falta de dinheiro para colocar encomendas de grande dimensão de uma só vez e a cada vez maior necessidade de personalizar ao gosto do cliente final, inserem uma nova variável no dia-a-dia das empresas industriais: a necessidade de flexibilidade total.

A principal dificuldade que qualquer responsável pela produção tem de enfrentar é a definição da ordem das encomendas (o que vai ser feito primeiro, em que máquinas, com que sequência). É um problema comum a praticamente todas as empresas, pois há uma enorme variedade de produtos e operações, quer no momento em que se vai definir o escalonamento inicial, quer na reação a alterações (novas datas, cancelamentos, novas encomendas urgentes, entre outros). Existem igualmente casos onde a criticidade não está na definição do escalonamento total, mas sim no escalonamento de máquinas específicas, seja devido às características diferentes que estas têm, seja devido ao peso que têm na fábrica (recursos limitados em operações críticas). As avarias nas máquinas e os atrasos dos fornecedores são apontados como fatores críticos, não do escalonamento inicial, mas sim da gestão diária e da necessidade de reagir às alterações.

Ficou clara a necessidade de ter uma aplicação que permita alterações constantes (seja através de uma intervenção manual, seja através de um reescalonamento automático) e que permita gerar soluções quer para o problema global, quer para partes mais pequenas do mesmo. Basicamente, um sistema flexível, que se adapte rapidamente de modo a poder acompanhar as constantes alterações que existem no dia-a-dia, propondo novas soluções de um modo automático e otimizado.

Para se poder fazer um correto escalonamento da produção, tem de existir a informação suficiente e esta tem de ser o mais fidedigna possível. Há empresas que apostaram numa clara informatização, com sistemas mais ou menos avançados e integrados de gestão mas, em muitos casos, a realidade encontrada está bastante aquém do ideal. Salvo algumas exceções, onde a informação circula de um modo quase automático, onde o controlo é concreto a todos os níveis e onde o circuito se torna relativamente simples, nos casos mais comuns acaba por se encontrar o uso de papel, as “estimativas”, a “intuição”, a ausência de registos e a falta de controlo. Sistemas antigos, desadequados, pouco práticos e nada intuitivos continuam a ser utilizados de modo a conseguir pelo menos ter o registo de alguma informação.

B. Conceitos fundamentais para o desenvolvimento do escalonador da produção

Encomenda prioritária: Existe claramente o conceito de “encomenda prioritária”, ou seja, encomendas ou pedidos que devem ter mais “peso” do que outros no momento em que está a ser definido o escalonamento. Essas situações existem por diversas razões, seja porque um determinado cliente é muito importante, seja por ser necessário produzir para um *stock* que se

está a esgotar, seja porque há um excelente negócio em vista.

Tipos de máquinas: Existem quase sempre máquinas com comportamentos diferentes do comum (considerando que o comum passa por ter uma máquina que executa uma operação de uma ordem de fabrico, num intervalo de tempo, entrando um determinado material e saindo outro transformado após a operação). Os casos mais usuais são as máquinas de pintura (ou de tingir) e os fornos. Ambas têm um conjunto de características semelhantes. Normalmente tratam várias ordens de fabrico em simultâneo, que têm de ser agrupadas de acordo com regras, o que implica que terminem a operação anterior (quase) ao mesmo tempo.

Ferramentas: Em determinadas operações são necessárias ferramentas adicionais (por exemplo, uma broca específica para fazer um determinado furo). Como as ferramentas existem de um modo limitado e podem ter de ser partilhadas, este tipo de recurso tem de ser considerado no escalonamento, de modo a garantir que está disponível no momento em que é necessário.

Roteiros: A previsão e criação de “roteiros” alternativos para as ordens de fabrico (alternativas para as operações a efetuar, seja com outras máquinas possíveis para a mesma operação ou outras sequências de operações), pode permitir agilizar a reação a alterações e flexibilizar a construção do escalonamento. Podem existir tempos de processamento diferentes para a mesma operação, se esta for efetuada em máquinas diferentes.

Interrupção de trabalhos: Em algumas situações pontuais, a execução de um trabalho pode ser interrompida sem que o trabalho esteja concluído. Por norma isto acontece com a chegada de novos trabalhos, considerados mais prioritários que o trabalho que estava a ser processado.

Processamento paralelo: Há situações em que podem existir várias máquinas paralelas (idênticas) a efetuar uma operação de uma ordem de fabrico de um modo repartido (por exemplo, para produzir 1000 peças para uma determinada encomenda podem estar quatro máquinas em paralelo a produzir 250 peças cada uma).

Adicionalmente, foram igualmente identificadas três situações que, de algum modo, acabam por ter uma relação direta com o escalonamento da produção, apesar de por si só serem problemas independentes: escalonamento de pessoal; gestão de *stocks*; envolvimento de transportadores.

A intervenção humana pode ser mais ou menos significativa nas operações de fabrico, de acordo com o tipo de produção, sendo que, quando existe mão-de-obra intensiva, a necessidade é constante. Nos restantes casos pode ser quase sempre encontrado um misto, onde em determinadas operações a intervenção humana é necessária (programação, carregamento, controlo e descarga das máquinas) e noutras onde é necessário um trabalho constante.

A existência de lotes de fabrico ou lotes económicos pode levar a que as quantidades produzidas não sejam exatamente as que foram solicitadas pelo cliente. Na produção de determinados produtos pode ser mais vantajoso produzir uma maior quantidade do que aquilo que é necessário. Se, por exemplo, para um dado produto A que é muito requisitado, for mais barato

produzir 50 unidades de uma só vez do que produzir duas vezes 25 unidades em separado, e se a dada altura forem necessárias apenas 25 unidades, pode compensar produzir desde logo 50 unidades e guardar os restantes 25 em *stock* para quando for necessário (desse modo, quando esses 25 são precisos, não é necessário esperar que sejam produzidos). A diferença de custo pode estar relacionada, por exemplo, com o custo de configuração ou de uso da máquina.

Quando é necessário mover um trabalho de uma máquina para outra (quando termina uma operação e de seguida tem de ser efetuada outra), há um tempo de transporte que traduz o tempo necessário para transportar esse trabalho entre essas duas máquinas. Nestas situações é preciso também ter em conta o número de “transportadores” existentes, pois se o seu número for insuficiente, é preciso avaliar a capacidade do *buffer* de cada máquina, ou seja, saber quantos trabalhos podem ficar em cada máquina à espera de serem transportados para outra.

5. Processo de escalonamento da produção

A. Informação base e as suas relações

De um modo geral, para elaborar um escalonamento da produção, é necessário ter em consideração três grandes componentes: as ordens de fabrico criadas, que representam toda a informação necessária para produzir um produto; as máquinas onde essas ordens de fabrico serão produzidas; as ferramentas que poderão ser necessárias para efetuar determinadas operações das ordens de fabrico.

Adicionalmente, de um ponto de vista mais abrangente, poderão também ser “ligados” a este problema do escalonamento outros sub-problemas: gestão de encomendas e gestão de *stocks*, que dão origem às ordens de fabrico que realmente vão ser escalonadas e produzidas; envolvimento de recursos humanos, considerando um problema adicional de escalonamento de pessoal; envolvimento de transportadores, considerando um outro problema de otimização combinatória, onde os transportes de material são relevantes.

Na Figura 1 é apresentada a estrutura de informação base necessária para o escalonamento da produção e as suas relações.

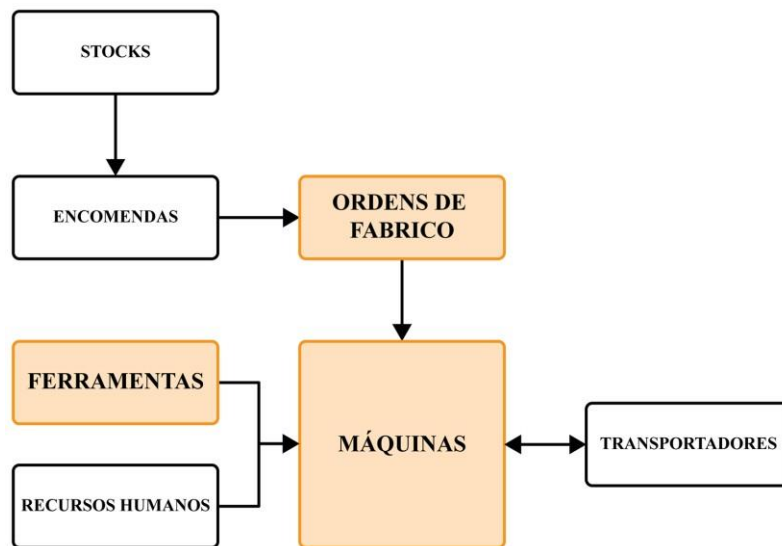


Figura 1 – Estrutura de informação base e as suas relações

B. Fases do processo de escalonamento da produção

Fazendo uma análise simples, existem claramente duas grandes fases no escalonamento da produção: uma fase de preparação e uma fase de execução.

Na fase de preparação, é tratada toda a informação que será necessária para a fase de execução, ou seja, é definido o que vai ser feito (que operações serão necessárias para produzir algo que foi encomendado), onde vai ser feito (que máquinas podem efetuar cada um dos trabalhos necessários), quanto tempo demora cada operação, que material ou ferramentas são necessárias, que prazos foram assumidos com o cliente, entre muitas outras decisões.

Na fase de execução, munido com toda a informação necessária, com todas as regras que tem de cumprir e com os objetivos que pretende atingir, o responsável pela produção define o escalonamento.

Um produto de escalonamento da produção deve seguir esta estrutura natural. Existe uma fase de tratamento ou inserção de toda a informação necessária (preparação), de modo a que seja possível efetuar um escalonamento automático e otimizado da produção (execução), bem como toda a manipulação e acompanhamento das soluções geradas.

C. A necessidade de reescalonamento

Assim que um plano de escalonamento é concluído, as operações na fábrica são iniciadas tentando segui-lo o mais à risca possível. Alguns pequenos desvios ao plano original podem ocorrer e ser ignorados. No entanto, quando ocorrem eventos de modo inesperado que obrigam a profundas alterações ou mesmo à mudança completa do plano inicial, é necessário intervir.

Em quase todos os casos analisados, o reescalonamento é constante e diário. Na realidade, uma grande parte das empresas vive muito mais num reescalonamento constante do que propriamente em processos fixos de escalonamento, o que torna ainda mais gritante a necessidade de uma ferramenta flexível, fácil de atualizar e que forneça respostas num curto espaço de tempo, tendo a noção exata do impacto que essas alterações poderão ter em toda a produção.

Foi possível confirmar, no terreno, que as principais razões que levam à necessidade de um reescalonamento são as apresentadas na maior parte dos estudos teóricos [Vieira et al. 2003]: avaria ou indisponibilidade de máquinas e ferramentas; absentismo dos trabalhadores; atraso na chegada ou escassez de material; material defeituoso; aparecimento de novas encomendas; cancelamento de encomendas; alterações nos prazos de entrega; alteração na prioridade das encomendas; problemas de qualidade que implicam a necessidade de refazer o produto; tempos de operação mal estimados.

Os principais problemas do reescalonamento prendem-se com saber determinar as melhores alturas para o fazer e como o fazer, visto que tanto a frequência com que é feito como as técnicas adotadas têm impacto no resultado final [Ouelhadj e Petrovic 2009].

6. Regras e qualidade de um escalonamento

Em qualquer solução resultante de um escalonamento, existe sempre um fator de qualidade associado (o cumprimento de objetivos), algo que permite identificar se uma solução é boa, má, melhor ou pior do que outra. De igual modo, um escalonamento só é válido e utilizável se respeitar todas as regras ou restrições que lhe forem impostos.

A. Objetivos

O cumprimento de prazos e a maximização da ocupação das máquinas foram referidos por todos os interlocutores como os principais objetivos a atingir. O foco na satisfação do cliente e no cumprimento das solicitações foi quase sempre indicado como o objetivo mais importante ou na pior das hipóteses com uma importância semelhante à maximização da ocupação dos recursos. Foi igualmente considerado interessante a inclusão de um terceiro objetivo relacionado com o controlo e diminuição dos tempos de *setup* das máquinas.

Assim, os interlocutores indicaram que uma boa solução é uma solução que cumpre os prazos definidos, ou seja, que entrega o resultado da ordem de fabrico solicitada sem atrasos. Ainda neste objetivo, pode ser considerado mais grave atrasar a produção de uma ordem de fabrico que vai satisfazer a encomenda de um cliente importante (prioridade da ordem de fabrico mais alta) do que uma outra ordem de fabrico com prioridade mais baixa.

Uma boa solução é uma solução que maximiza a ocupação das máquinas, ou seja, que utiliza os recursos perto da sua capacidade máxima, aproveitando todo o tempo possível para estar a produzir. Maior produção significa normalmente maior ganho financeiro. Uma máquina que esteja a produzir está a acrescentar valor. No entanto, este objetivo não pode ser encarado de um modo isolado. Não adianta estar sempre a produzir se não se estiver a produzir o que é necessário, ou seja, uma solução em que as máquinas estejam sempre em produção, mas onde fizeram metade das ordens de fabrico uma semana antes do que deviam e a outra metade uma semana depois de ter terminado o prazo de entrega acordado com o cliente, não é garantidamente uma boa solução.

Uma boa solução é uma solução que minimiza os tempos de *setup* das máquinas, ou seja, que tenta evitar que as máquinas estejam constantemente paradas a serem preparadas para produzir algo diferente do que produziram antes. Se for, por exemplo, necessário pintar duas ordens de fabrico de branco e outras duas de preto, se forem pintadas primeiro as duas de branco e depois as duas de preto, existirão tempos de *setup* muito inferiores do que se alternar as cores (considerando que sempre que se muda de cor é necessário efetuar uma limpeza à máquina - *setup*). No entanto, não adianta estar a produzir as duas operações de branco primeiro e depois as duas de preto, se os prazos de entrega indicarem algo completamente diferente.

Os objetivos indicados avaliam a qualidade da solução, mas muito mais do que o seu cumprimento individual, o que realmente permite encontrar uma boa solução é o equilíbrio entre todos eles, ou seja, a combinação que consiga respeitar o mais possível cada um deles individualmente, sem prejudicar demasiado os restantes. De caso para caso, de acordo com a política da empresa, a importância de cada um destes objetivos varia, sendo portanto necessário que a sua hierarquização possa ser definida pelo responsável da produção.

B. Restrições

Um recurso (máquina ou ferramenta) só pode estar ocupado com um trabalho em cada momento, não sendo possível atribuir uma carga superior à que o recurso pode cumprir.

Os recursos têm igualmente horários de trabalho associados que têm de ser cumpridos, não podendo ser atribuído trabalho a um recurso fora do horário de disponibilidade definido.

Tem de ser respeitado o tempo de configuração que as máquinas poderão ter para poder iniciar um trabalho (*setup* quando a máquina é ligada ou quando troca de tipo de tarefa), ou os limites de tempo consecutivo de funcionamento das mesmas, por razões técnicas.

Apesar do cumprimento dos prazos de entrega ser considerado um dos principais objetivos do escalonamento da produção, pode ser, em alguns casos, mais do que isso: pode ser uma restrição. Se associado a uma determinada encomenda existir, por exemplo, uma informação que indique que uma ordem de fabrico não pode terminar antes de uma determinada data ou depois de uma outra data, só serão aceites soluções que cumpram rigorosamente essas regras.

Existem quase sempre precedências entre operações de uma ordem de fabrico, ou seja, por exemplo, a operação *B* só pode começar depois da operação *A* terminar.

De igual modo, se só for possível iniciar uma operação a partir de uma data indicada (necessidade de materiais que só chegarão num determinado dia, por exemplo), essa regra terá de ser respeitada.

Se existirem tempos de espera mínimos e máximos entre duas operações, estes terão de ser respeitados. Assim, uma operação pode ter de esperar um tempo mínimo desde o final da operação anterior para se poder iniciar, ou pode ter um intervalo de tempo máximo, desde o final da operação anterior, no qual tem obrigatoriamente de se iniciar.

Se existirem operações que não podem ser interrompidas, a regra terá de ser respeitada e a operação terá de ser feita de uma vez, sem pausas.

Na Figura 2 pode ser observada a arquitetura de alto-nível de um processo de escalonamento da produção, suportado por um sistema de apoio à decisão.

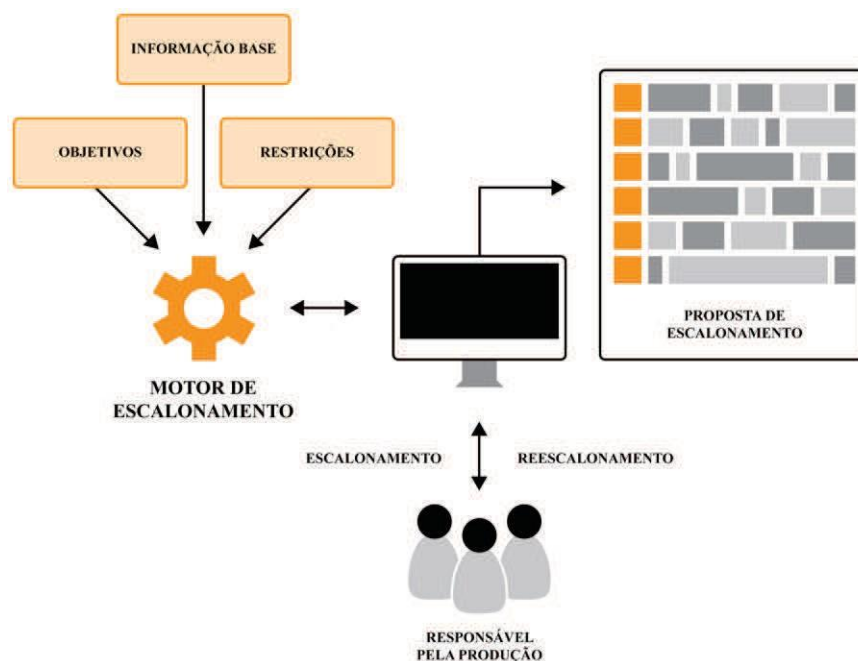


Figura 2 – Escalonamento da produção com um sistema de apoio à decisão

7. Conclusões

A esmagadora maioria das empresas industriais portuguesas continua a gerir o escalonamento da produção de um modo manual.

Numa grande parte dos casos analisados, o escalonamento é dividido dentro da fábrica, ou seja, existem “ilhas” de decisão que tornam impossível uma otimização global, porque o que é ótimo para um determinado sector (de um modo individual) pode ser péssimo para o seguinte ou para a fábrica de um modo geral.

Mesmo com as divisões existentes, normalmente existe um responsável pela produção que tem de produzir o escalonamento e tomar todas as decisões diárias do chão de fábrica, sendo este o utilizador ideal de uma ferramenta de escalonamento automático e o principal beneficiado da mesma (em termos operacionais), uma vez que teria ao seu dispor uma potente aplicação de apoio à decisão, que facilitaria o seu trabalho diário.

Apesar do tempo gasto com a tarefa de produzir manualmente o escalonamento da produção ser muito variável, foi unânime, por parte dos responsáveis das empresas, que uma ferramenta automática e otimizada de cálculo produziria melhores resultados finais, traria uma enorme flexibilidade e permitiria um apoio à decisão fundamental.

Verificou-se que, em quase todos os casos, as sequências de fabrico dos produtos são diferentes, o que torna o escalonamento da produção mais complexo. Foi identificado um novo paradigma na indústria: cada vez mais são pedidas pequenas quantidades e muita diversidade de produtos.

Foram identificadas as principais dificuldades encontradas na definição do escalonamento da produção, como a definição da ordem das encomendas, o escalonamento de máquinas específicas, o absentismo, as avarias nas máquinas ou os atrasos dos fornecedores.

Foi possível constatar que existem algumas deficiências nos Sistemas de Informação das empresas e que é necessário trabalhar esse ponto, uma vez que para se poder fazer um correto escalonamento da produção tem de existir a informação suficiente e esta tem de ser fidedigna.

A necessidade de ter uma ferramenta poderosa e flexível de reescalonamento foi notória, uma vez que quando ocorrem eventos de modo inesperado, que obrigam a profundas alterações ou mesmo à mudança completa do plano inicialmente traçado, é necessário intervir rapidamente, de um modo seguro e apoiado, para não colocar em risco o normal funcionamento da fábrica.

Como objetivos esperados de um bom escalonamento da produção, foram claramente apontados o cumprimento de prazos e a maximização da ocupação das máquinas.

O estudo apresentado de um modo resumido neste artigo foi uma das fases iniciais de um projeto da empresa Bullet Solutions, apoiado pelo Sistema de Incentivos à Investigação e Desenvolvimento Tecnológico do QREN, que teve como objetivo final o desenvolvimento de uma aplicação informática de escalonamento da produção, adaptada à realidade da indústria portuguesa – o Bullet Scheduler.

8. Referências

- Bierwirth, C. and Mattfeld, D. C., “Production Scheduling and Rescheduling with Genetic Algorithms”, *Evolutionary Computation*, Vol. 7, pp. 1-17, 1999.
- Brucker, P. and Knust, S., “Complex scheduling”, GOR Publications, Springer, 2012.
- Brucker, P., “Scheduling algorithms”, 5th Ed., Springer, 2007.
- Brucker, P., Jurisch, B. and Sievers, B., “A branch and bound algorithm for the job-shop scheduling problem”, *Discrete Applied Mathematics*, Vols. 49, Issue 1-3, pp. 109-127, 1994.
- Dominic, P. D. D., Kaliyamoorthy, S. and Kumar, M. S., “Efficient dispatching rules for dynamic job shop scheduling”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, pp. 70-75, 2004.
- Geyik, F. and Cedimoglu, I. H., “The strategies and parameters of tabu search for job-shop scheduling”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vols. 15, Issue 4, pp. 439-448, 2004.
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J. and Ram, S., “Design Science in Information Systems Research”, *MIS Quarterly*, 28(1), 75-105, 2004.
- Jain, A. and Meeran, S., “Deterministic job-shop scheduling: past, present and future”, *European Journal of Operational Research*, vol. 113, pp. 390-434, 1999.
- Laarhoven, P. J. M. van, Aarts, E. H. L. and Lenstra, J. K., “Job Shop Scheduling by Simulated Annealing”, *Operations Research*, Vols. 40, N 1, pp. 113-125, 1992.

Lopez, P. and Roubellat, F., “Production scheduling”, 1st Ed., Wiley-ISTE, 2008.

Ouelhadj, D. and Petrovic, S., “A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems”, *Journal of Scheduling*, vol. 12, no. 4, pp. 417-431, 2009.

Pinedo, M., “Scheduling theory, algorithms, and systems”, 4th Ed., Springer, 2012.

Vieira, G., Herrmann, J. and Lin, E., “Rescheduling manufacturing systems: a framework of strategies, policies, and methods”, *Journal of Scheduling*, vol. 6, pp. 39-62, 2003.

Watson, J., Whitley, L. D. and Howe, A. E., “A Dynamic Model of Tabu Search for the Job- Shop Scheduling Problem”, *Proceedings of the 1st Multidisciplinary International Conference on Scheduling: Theory and Applications*, pp. 247-266, 2005.

Zhang, R. and Wu, C., “A hybrid approach to large-scale job shop scheduling”, *Applied Intelligence*, Vols. 32, Issue 1, pp. 47-59, 2010.