

PROPOSIÇÃO DE UMA NOVA HEURÍSTICA DE SEQUENCIAMENTO BASEADA NO ATC PARA APLICAÇÃO EM AMBIENTE FARMACÊUTICO COM TAREFAS MULTI-COMPLEXAS

Thiago Franzen Aydos (thiago.aydos@gmail.com)
Michel José Anzanello (michel.anzanello@gmail.com)

Resumo

Para atender demandas da programação da produção em um ambiente farmacêutico realizou-se um estudo aprofundado da heurística “Apparent Tardiness Cost” (ATC). O cenário em questão possui como funções objetivo a redução do tempo total de atraso e a diversificação do “mix” de produção, de forma a alternar tarefas e complexidades diferentes. Com o domínio dessa ferramenta multicriterial, este artigo propõe uma nova regra de sequenciamento derivada do ATC, que atende as funções solicitadas. O “Apparent Tardiness Cost with Task Complexity” (ATCTC) visa reduzir a concentração de tarefas de mesma complexidade no ordenamento, sem que isso cause prejuízo no atendimento às datas de entrega. Uma aplicação da nova heurística foi realizada em uma empresa do ramo e simulações estatísticas foram feitas para verificar o seu comportamento em um cenário farmacêutico com parâmetros variados. Os resultados obtidos comprovam a eficácia da nova heurística e sugerem significativo potencial para pesquisas futuras.

Palavras-Chave: ATC, ATCTC, Sequenciamento, Setor Farmacêutico, heurística de programação, complexidade.

1. INTRODUÇÃO

Técnicas de sequenciamento da produção têm sido amplamente utilizadas para definição de arranjos adequados à sistemas produtivos nos mais variados setores. Essas técnicas são conhecidas por uma pequena parte dos profissionais do ramo, tendo em vista que sua aplicação se apóia frequentemente em softwares específicos para determinado fim, onde se conhece pouco sobre o funcionamento da heurística de sequenciamento e muito sobre seus resultados. Para solucionar os desafios da programação da produção, diversas heurísticas de sequenciamento foram criadas, dentre as quais destacam-se o SPT (*Shortest Processing Time*) (Lawrence e Sewell, 1997) e o *Branch and Bound* (Brah e Hansucker, 1991). Segundo Ichmura (1997), em um ambiente de inovações tecnológicas constantes com diversidade de demanda e intensificação da competitividade, torna-se necessário diminuir os lotes de peças e

adotar um sistema estruturado de ordenação de produção, de modo a ordená-la conforme a demanda, em quantidades limitadas e com menor *lead time*.

Ambientes produtivos onde o fluxo produtivo é definido a partir das datas de entrega previamente definidas, com constante entrada de novas tarefas caracterizadas por maior ou menor prioridade de atendimento, fazem com que as empresas busquem alternativas muitas vezes indesejáveis para atender aos seus objetivos. Uma delas é o uso excessivo de turnos extras de trabalho. Segundo Pinedo (2008), um dos objetivos do sequenciamento da produção é a melhor utilização dos recursos da planta de forma a reduzir a utilização de horas extras e aumentar a produtividade. Acredita-se que, com uma programação eficiente e dinâmica da produção, é possível melhorar a produtividade e atender aos prazos sem este tipo de artifício indesejado.

Buscando endereçar a demanda por soluções de sequenciamento na produção de produtos hospitalares em uma indústria farmacêutica, este artigo propõe uma regra baseada na heurística de sequenciamento *Apparent Tardiness Cost* (ATC), visando atender os prazos determinados e reduzir o tempo total de atraso. Wisner e Siferd (1995) afirmam que cumprir com as datas de entrega é o objetivo mais importante da programação, e apenas 58% dos gestores industriais trabalham para atender essa demanda. A regra ATC possui característica multicriterial, tendo sua aplicação amplamente indicada em ambientes complexos com diversidade significativa de variáveis consideráveis. Dentre as proposições deste estudo, são analisadas primeiramente as regras mais relevantes associadas ao ATC, a fim de auxiliar no desenvolvimento de uma nova regra que reduza os tempos de atraso e aumente a eficiência do arranjo em questão. A regra resultante será inicialmente testada em dados reais oriundos de um sistema de produção hospitalar, e então avaliada através de experimentos de simulação.

Este artigo está organizado como segue. Na seção 2, é apresentado o referencial teórico acerca das principais regras de ATC. Na seção 3 é apresentada a metodologia a ser utilizada. Na seção 4 são expostos os resultados e, por fim, a seção 5 traz a conclusão do artigo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O sequenciamento da produção constitui um campo de estudo da Engenharia de Produção estratégico para a administração de sistemas produtivos. Segundo Pinedo (2008), sequenciamento é a alocação de recursos destinados a tarefas em um determinado período de tempo, visando otimizar um ou mais objetivos. Esses recursos e tarefas são organizados em diversas formas, podendo representar máquinas em um chão de fábrica, pistas de pouso em um aeroporto, pontes rolantes em um canteiro de obras e unidades de processamento em um ambiente computacional, entre outros. Buscar arranjos de sequenciamento a partir de métodos científicos pode trazer benefícios que, muitas vezes, são de fácil percepção para o gestor. Na gestão de um ambiente produtivo, é possível mensurar o custo do esforço despendido para a maioria das tarefas realizadas, possibilitando assim perceber as melhorias geradas pelo sequenciamento. Reduzir tempos de execução e melhorar o aproveitamento dos recursos pode gerar ganhos financeiros reais, possibilitando melhor gerenciamento do turno de trabalho e criando oportunidades de melhoria geral de um sistema produtivo.

Sistemáticas de sequenciamento buscam otimizar funções objetivo intimamente ligadas ao contexto produtivo (Slack et al. 2002): pode-se ordenar tarefas a partir da percepção da prioridade do consumidor, onde, por exemplo, deve-se atender o mais rapidamente o consumidor em situação de emergência, consumidores insatisfeitos que estejam pensando em cancelar a solicitação ou até mesmo consumidores que tenham contrato de prioridade. É possível ainda priorizar tarefas a partir dos prazos previamente acordados com o cliente, onde o trabalho é sequenciado de acordo com as datas de entrega de forma a atender ao máximo de encomendas possíveis ou minimizar o tempo total de atraso. Também se pode priorizar sequenciamento a partir do tempo de trabalho a ser realizado, onde é possível minimizar o tempo total gasto em um processo ou minimizar o tempo ocioso dos centros de trabalho.

Os problemas de sequenciamento com função objetivo relacionada ao tempo total de atraso são do tipo NP-Hard (*non-deterministic polynomial-time hard*) mesmo para um sistema com uma única máquina (Du et al., 1990). Como o problema de uma máquina única é uma simplificação do problema de tempo total de atraso em máquinas paralelas, o problema de máquinas paralelas também é NP-Hard.

Para resolver problemas de sequenciamento em ambientes de nível de complexidade elevado, são utilizados métodos computacionais chamados de heurísticas ou algoritmos. Este estudo aborda a aplicação da heurística *Apparent Tardiness Cost (ATC)*, desenvolvida por Rachamadugu e Morton (1982), com vistas à minimização do tempo total de atraso em um grupo de tarefas com datas de entrega e tempos de processo definidos. Como exposto a seguir, essa heurística vem sofrendo modificações de forma a adequá-la à realidade produtiva dos mais variados cenários. De forma genérica, o problema do ATC consiste em um grupo de n tarefas a serem processadas por uma ou mais máquinas. Cada tarefa possui as seguintes variáveis: tempo de processamento (p_j), que é o tempo contado desde o início até o final da realização da tarefa; um tempo de entrega (d_j), que é o tempo limite que a tarefa deve ser realizada ou entregue; um peso ou penalidade (w_j), que deve ser estimado a partir de fatores de priorização ou penalidades por atraso na entrega da tarefa; um instante de liberação (r_j), que consiste no período de tempo que a tarefa deve aguardar até o início da sua execução. Para as tarefas subsequentes à tarefa executada, é considerado o tempo de *setup* (s_{ij}), que consiste no tempo necessário para ajustar as condições de execução da tarefa na espera, ou seja, é o tempo que precede a sua execução. Por fim, a heurística de ATC pode utilizar parâmetros de escala, k , obtidos de forma empírica de acordo com o sistema em análise.

Rachamadugu e Morton (1982) propuseram a regra do ATC a fim de minimizar o tempo total de atraso em uma máquina única. A regra integra um termo associado ao tempo de processamento com um termo de folga, utilizando a variável de data de entrega da tarefa, conforme a equação (1). O primeiro termo, chamado de Termo de Priorização, atribui às tarefas com alta prioridade w_j ou baixo tempo de processamento p_j um índice elevado. O segundo termo é chamado de Termo de Folga, o qual prioriza tarefas com data de entrega mais próxima e quando o instante de liberação não for próximo.

$$ATC(t, j) = \frac{w_j}{p_j} * \exp\left(-\frac{\max(d_j - r_j - t, 0)}{k^1 * p_{med}}\right) \quad (1)$$

Zhang et al. (2012) utilizaram a regra do ATC para propor um modelo de sequenciamento em sistemas *Job Shop* com três funções objetivo, a partir da análise dos problemas enfrentados no setor automotivo. Segundo Jensen et al. (1995), o ATC é a heurística de sequenciamento mais efetiva para minimizar o critério de tempo total de

atraso. Lamothe et al. (2012) afirmam que a regra é conhecida por ser eficiente em modelos com máquinas para reduzir tempos de atraso, e propõem duas extensões da regra: o ATCOEE (*Apparent Tardiness Cost with Overall Equipment Effectiveness*) e o ATCOEEF (*Apparent Tardiness Cost with Overall Equipment Effectiveness and Flexibility*). Valente et al (2012) também defendem que estudos computacionais mostram o ATC como uma das heurísticas com melhor desempenho no atendimento da função objetivo, considerando as regras existentes para problemas lineares.

A partir da regra básica do ATC, vários pesquisadores desenvolveram aprimoramentos de forma a incluir variáveis que afetassem diretamente, na busca pela melhor solução de sequenciamento. Essas são as chamadas “ATC-Based Rules”. A regra do *Apparent Tardiness Cost with Setups* (ATCS) considera sequenciamento com *setups* dependentes, ou seja, considerando o tempo de preparação que antecede o início de uma determinada atividade. Segundo Lee et al.(1997), o ATCS é a regra mais compacta com um termo de *setup* S_{ij} entre duas atividades à tradicional regra do ATC, conforme a equação (2).

$$ATCS(t, i, j) = \frac{w_j}{p_j} * \exp\left(-\frac{\max(d_j - r_j - t, 0)}{k^1 * p_{med}}\right) * \exp\left(-\frac{S_{ij}}{k^2 * S_{med}}\right) \quad (2)$$

onde i = última tarefa programada; S_{ij} = tempo de *setup* entre duas atividades e S_{med} = tempo médio de *setup* de todas as atividades

Park et al. (2000) realizaram um estudo de sequenciamento de tarefas em máquinas paralelas e propuseram uma extensão do ATCS que utiliza parâmetros *look-ahead* para calcular o índice de prioridades de cada tarefa. Embasados na regra do ATCS, Pfund et al. (2008) propuseram a regra *Apparent Tardiness Cost with Setups and Ready times* (ATCSR), a fim de solucionar o problema de sequenciamento de tarefas considerando os tempos de liberação de tarefas em máquinas paralelas idênticas com *setups* dependentes da sequência. Trata-se de uma das mais efetivas regras de sequenciamento, visto que permite solucionar problemas dinâmicos com *setups* dependentes da sequência e do instante de liberação. A fórmula é apresentada na equação (3).

$$ATCSR(t, i, j) = \frac{w_j}{p_j} * \exp\left(-\frac{\max(d_j - r_j - t, 0)}{k^1 * p_{med}}\right) * \exp\left(-\frac{s_{ij}}{k^2 * s_{med}}\right) * \exp\left(-\frac{\max(r_j - t, 0)}{k^3 * p_{med}}\right) \quad (3)$$

Driessel et al. (2010) utilizam ATCSR como principal *benchmarking* de comparação para avaliar o desempenho das variantes do método de busca de variáveis “*Variable Neighborhood Search*” (VNS) (Mladenovic e Hansen, 1997) em máquinas paralelas, onde citam sua aplicabilidade no setor de produção de semicondutores.

Xi e Jang (2012) propuseram duas extensões do ATC: o *Modified Aparent Tardiness Cost with Setups and Ready Times* (MATCSR) foi proposto para solucionar o problema em uma máquina única com tempos de liberação futuros e *setups* dependentes de sequência contínua. Nesta regra, descrita pela equação (4), o primeiro termo inclui o tempo de *setup* dependente da sequência e o tempo desde a tomada de decisão até o instante de liberação da tarefa, de forma a evitar que tarefas com menor instante de liberação sejam prorrogadas.

$$MATCSR(t, i, j) = \frac{w_j}{p_j + s_{ij} + \max(r_j - t, 0)} * \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - s_{ij} - \max(r_j, t), 0)}{k^1 * p_{med}}\right) \quad (4)$$

$$* \exp\left(-\frac{s_{ij}}{k^2 * s_{med}}\right) * \exp\left(-\frac{\max(r_j - t, 0)}{k^3 * p_{med}}\right)$$

A segunda extensão proposta por Xi e Jang (2012), chamada de *Apparent Tardiness Cost with Separable Setup and Ready Time* (ATCSSR), visa liberar uma atividade somente após o *setup*. Quando uma tarefa é finalizada, ambas as regras selecionam outra em espera para ser processada a seguir. O MATCSR permite que a máquina permaneça disponível antes da preparação do *setup*, enquanto o ATCSSR permite que a máquina esteja disponível somente após o *setup*. Um exemplo disto é quando o *setup* de uma tarefa selecionada é iniciado no tempo de decisão e pode ser finalizado antes que a tarefa selecionada esteja liberada para processamento. O ATCSSR é apresentado na equação (5).

$$ATCSSR(t, i, j) = \frac{w_j}{p_j + \max(s_{ij}, r_j - t)} * \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - \max(r_j, t + s_{ij}), 0)}{k^1 * p_{med}}\right) \quad (5)$$

$$* \exp\left(-\frac{s_{ij}}{k^2 * s_{med}}\right) * \exp\left(-\frac{\max(r_j - t - s_{ij}, 0)}{k^3 * p_{med}}\right)$$

Em testes de comparação de regras para ambientes com *setup* contínuo e separado, as regras do MATCSR e ATCSSR superam a regra ATCSR. A Tabela 1 apresenta as cinco regras de ATC citadas, desmembradas em seus termos.

Tabela 1 – Regras baseadas no ATC .

| Regra | Termo de Priorização | Termo de Folga | Termo de Setup | Termo de Liberação |
|------------------|---|--|--|---|
| ATC (1982) | $\frac{w_j}{p_j}$ | $\exp\left(-\frac{\max(d_j - r_j - t, 0)}{k^1 * p_{med}}\right)$ | - | - |
| ATCS (1997) | $\frac{w_j}{p_j}$ | $\exp\left(-\frac{\max(d_j - r_j - t, 0)}{k^1 * p_{med}}\right)$ | $\exp\left(-\frac{s_{ij}}{k^2 * s_{med}}\right)$ | - |
| ATCSR (2008) | $\frac{w_j}{p_j}$ | $\exp\left(-\frac{\max(d_j - r_j - t, 0)}{k^1 * p_{med}}\right)$ | $\exp\left(-\frac{s_{ij}}{k^2 * s_{med}}\right)$ | $\exp\left(-\frac{\max(r_j - t, 0)}{k^3 * p_{med}}\right)$ |
| MATCSR (2012) | $\frac{w_j}{p_j + s_{ij} + \max(r_j - t, 0)}$ | $\exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - s_{ij} - \max(r_j, t), 0)}{k^1 * p_{med}}\right)$ | $\exp\left(-\frac{s_{ij}}{k^2 * s_{med}}\right)$ | $\exp\left(-\frac{\max(r_j - t, 0)}{k^3 * p_{med}}\right)$ |
| ATCSSR (2012) | $\frac{w_j}{p_j + \max(s_{ij}, r_j - t)}$ | $\exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - \max(r_j, t + s_{ij}), 0)}{k^1 * p_{med}}\right)$ | $\exp\left(-\frac{s_{ij}}{k^2 * s_{med}}\right)$ | $\exp\left(-\frac{\max(r_j - t - s_{ij}, 0)}{k^3 * p_{med}}\right)$ |

(Adaptação de Pfund et al, 2008)

3. MÉTODO

A partir da análise do portfólio de produtos da empresa escolhida para o estudo, identificou-se características críticas que influenciam significativamente no processo de sequenciamento. Primeiramente, as datas de entrega (d_j) possuem a prioridade mais elevada e devem ser atendidas com rigor pelos motivos descritos anteriormente. Os tempos de processamento (p_j) são conhecidos. Não há sistemática de priorização de consumidores por parte da empresa, mas sim uma prioridade de famílias de produtos, as quais são produzidas por encomenda e não podem atrasar. Outro fator a ser considerado é o de repetitividade do processo, que muitas vezes implica em prejuízos físicos para os operadores. Muitas materias primas possuem peso elevado e o seu manuseio por muito tempo de forma ininterrupta pode gerar danos físicos e doenças de esforço repetitivo. A complexidade da composição dos produtos também deve ser considerada. É sabido que intercalar produtos com diferentes especificações ou complexidades pode diminuir a repetitividade nos processo e a probabilidade de falhas de operação, prevenindo doenças relacionadas ao trabalho por esforço repetitivo (Strasser, 1995).

A fim de tornar o estudo viável dentro das premissas já estabelecidas pelos autores das regras, deve-se adequar a forma de como visualizar o sistema produtivo farmacêutico. As salas de trabalho serão consideradas como máquinas idênticas em paralelo, com *setup* dependente da sequência. O instante de liberação das tarefas será considerado zero para todos os produtos. Neste momento, os parâmetros de *look-ahead* também possuem valor igual a 1, pois o autor acredita que será mais adequado equilibrar os pesos dos termos com coeficientes, identificados a partir da criação de cenários e análise de resultados.

A nova regra derivada do ATC será proposta conforme segue no item 3.1. Após definida a estrutura da nova heurística, realiza-se uma breve análise sobre a calibração da constante Kc , e a seguir a aplicação da regra no cenário farmacêutico será analisada. A fim de prosseguir com o estudo da regra, uma série de testes e simulações são feitas para verificar a eficiência do ATCTC em comparação com a heurística do ATC.

3.1 COMPOSIÇÃO DO APPARENT TARDINESS COST WITH TASK COMPLEXITY (ATCTC)

O primeiro termo a ser adicionado na composição da regra proposta é o termo de priorização, $\frac{w_j}{p_j}$. O termo de folga também é adicionado, baseando-se na regra original do ATC, conforme $\exp\left(-\frac{\max(d_j - r_j - t, 0)}{k^1 * p_{med}}\right)$.

O terceiro termo, contribuição original deste artigo, é o termo de Complexidade, o qual objetiva alternar tarefas de diferentes níveis de complexidade (ou seja, a regra não permitirá que tarefas similares sejam ordenadas em sequência, a menos que se encontrem em situação de atraso). O termo $\exp\left(-\frac{(N^oRep)}{Kc*(Kc+Ta)}\right)$ é composto como segue: o numerador possui uma variável chamada de N^oRep , que contabiliza o número de repetições que ocorrem quando tarefas de mesma complexidade são inseridas em sequência. Dessa forma, quanto maior o valor de N^oRep , menor será o índice da tarefa a ser alocada. No denominador aparecem duas variáveis distintas: uma Constante de Complexidade (Kc) e uma variável de Tempo de Atraso (Ta). A constante de complexidade é usada para definir o grau de impacto que o termo terá no índice de ordenamento da tarefa. Quanto menor Kc , maior será o impacto do termo na composição do índice de ordenamento. O valor de Kc é obtido de forma empírica, como demonstrado a seguir.

A variável de Tempo de Atraso (Ta_j) visa reduzir a penalização das tarefas que já estiverem com atraso de entrega. O Tempo de Atraso (Ta_j) constitui o valor das horas totais de atraso em que uma tarefa estará após o seu processamento. Ou seja, $Ta = d_j - r_j - p_j$. Com a sua inclusão no denominador, penaliza-se de forma menos rigorosa tarefas que estejam em atraso. Dessa forma, a alternância de complexidades não irá causar maiores impactos no tempo total de atraso. As duas variáveis apresentadas aparecem multiplicadas pela variável Kc , para regular o impacto destas sobre o valor final do termo, atribuindo assim maior significância à constante.

A fórmula será chamada de ATCTC conforme apresentado na equação (6):

$$ATCTC(t, j) = \frac{wj}{pj} * \exp\left(-\frac{\max(dj - rj - t, 0)}{k^1 * pmed}\right) * \exp\left(-\frac{(N^{\circ}Rep)}{Kc * (Kc + Ta)}\right) \quad (6)$$

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

4.1 CALIBRAÇÃO DE Kc

Detalhes acerca da definição da constante Kc são agora apresentados. Para identificar um valor apropriado para a constante, simulações com diferentes valores de Kc foram realizadas, avaliando-se o valor final do Termo de Complexidade e identificando o valor mais adequado para a constante. Para tanto, a análise foi feita considerando somente tarefas isentas de atrasos, ou seja, $Ta=0$.

Tabela 2 – Valores finais do Termo de complexidade para diferentes valores de Kc .

| Kc | Nº de Repetições de Complexidade | | | | | | | | | |
|----|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 0,3679 | 0,1353 | 0,0498 | 0,0183 | 0,0067 | 0,0025 | 0,0009 | 0,0003 | 0,0001 | 0,0000 |
| 2 | 0,7788 | 0,6065 | 0,4724 | 0,3679 | 0,2865 | 0,2231 | 0,1738 | 0,1353 | 0,1054 | 0,0821 |
| 3 | 0,8948 | 0,8007 | 0,7165 | 0,6412 | 0,5738 | 0,5134 | 0,4594 | 0,4111 | 0,3679 | 0,3292 |
| 4 | 0,9394 | 0,8825 | 0,8290 | 0,7788 | 0,7316 | 0,6873 | 0,6456 | 0,6065 | 0,5698 | 0,5353 |

A tabela mostra que, quanto maior o valor de Kc , menor será a penalização da tarefa. Para realizar a escolha do valor, foram considerados dois aspectos: a quantidade de repetições aceitáveis no cenário a ser simulado e o grau de penalização que o termo deve atribuir no ordenamento da tarefa. No cenário em questão, busca-se uma alternância de tarefas (ou seja, que tarefas de mesma complexidade não sejam colocadas em sequência). Ao definir $Kc = 2$, penaliza-se de forma significativa a tarefa desde a primeira repetição, atribuindo o valor ao índice de 77,8% do seu valor original, e distribuindo os valores de penalização de forma satisfatória entre as seis primeiras repetições, dando assim estabilidade ao funcionamento do termo e se adequando ao cenário de aplicação.

Para testar a eficácia desta combinação, verificou-se o impacto do valor da variável no Termo de Complexidade com quantidades de horas de atraso distintas, utilizando Kc

com diversos valores. Os resultados são apresentados na Tabela 3, utilizando-se a constante $Kc = 2$.

Tabela 3 – Valores finais do Termo de complexidade para diferentes valores de Ta .

| Ta | Nº de Repetições de Complexidade | | | | | |
|----|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 5 | 0,3679 | 0,1353 | 0,0498 | 0,0183 | 0,0067 | 0,0025 |
| 15 | 0,9817 | 0,9636 | 0,9460 | 0,9286 | 0,9116 | 0,8948 |
| 30 | 0,9899 | 0,9800 | 0,9702 | 0,9604 | 0,9507 | 0,9412 |
| 45 | 0,9931 | 0,9862 | 0,9794 | 0,9726 | 0,9659 | 0,9592 |

Os resultados confirmam que o Termo de Complexidade diminui a penalização das tarefas à medida que o valor do tempo de atraso aumenta, reduzindo o tempo total de atraso e evitando alocação de tarefas de mesma complexidade em sequência.

4.2 APLICAÇÃO EM UMA EMPRESA DO SETOR FARMACÊUTICO

O cenário de estudo constitui-se em um sistema produtivo de itens farmacêuticos hospitalares. A empresa está situada em Porto Alegre e conta com 30 funcionários diretos, produzindo bolsas de até 5 litros com soluções para tratamento de pacientes. A empresa conta com um portfólio de 25 produtos, com variações de especificações técnicas relevantes, como a composição química, volume e prazos de entrega. O sistema de produção é misto, onde a produção é alternada por ciclos de produções empurrada e puxada. A produção é empurrada, baseada em uma previsão de mercado calculada a partir de um modelo simples baseado nas vendas passadas. Quando há necessidade de atender demandas pontuais, torna-se necessário puxar a produção. O cumprimento das normas regulamentadoras de segurança e qualidade, e o atendimento aos prazos de entrega são aspectos de extrema importância para a satisfação dos clientes. A empresa realiza o gerenciamento da programação de forma empírica, com o auxílio de fichas de controle de prazos.

Por se tratar de um sistema de produção onde cada operador é encarregado de todas as etapas de manufatura do produto, os postos de trabalho são considerados como máquinas únicas com mesmo tempo de processamento e de *setup*. A pesquisa realizada caracteriza-se como aplicada, quantitativa e de caráter experimental, visando

desenvolver a adaptação de uma regra de sequenciamento multicriterial já existente para o cenário farmacêutico e verificar os resultados da sua aplicação.

Dados da programação da produção da empresa foram coletados e uma comparação foi realizada utilizando as heurísticas ATC e ATCTC. O período de produção programado é de dez dias. Os tempos de processamento variam de duas a três horas para preparação e execução das tarefas. Cada tarefa possui uma data de entrega e uma família de complexidade. No cenário em questão, produtos de apenas dois grupos de complexidade são considerados: tipo 1 e 2. Para ambas as regras, atribui-se o valor para a constante de folga $k_j = 1$. Para constante de complexidade, conforme explicado anteriormente, atribuiu-se o valor de $Kc = 2$. Como a empresa não possui priorização de clientes ou famílias de produtos, ao parâmetro w_j também será atribuído valor $w_j = 1$.

A Tabela 5 apresenta o resultado da programação com as duas heurísticas, especificando ordem de produção, código das tarefas, complexidade da tarefa e o tempo de atraso da tarefa após a sua realização. Nos campos de resultados do ATCTC, as linhas em **negrito** indicam que a ordem foi alterada em comparação com o ATC.

Tabela 5 – Comparação das sequências geradas pelas regras ATC e ATCTC.

| Ordem | ATC | | | ATCTC | | |
|-------|---------------|---------|------------|---------------|----------|-------------|
| | Código Tarefa | Complex | Atraso (h) | Código Tarefa | Complex | Atraso (h) |
| 1 | 2 | 2 | 0,00 | 2 | 2 | 0,00 |
| 2 | 17 | 2 | 0,00 | 17 | 2 | 0,00 |
| 3 | 4 | 1 | 0,00 | 4 | 1 | 0,00 |
| 4 | 18 | 2 | 0,00 | 18 | 2 | 0,00 |
| 5 | 30 | 2 | 0,00 | 15 | 1 | 0,00 |
| 6 | 15 | 1 | 0,00 | 30 | 2 | 0,00 |
| 7 | 16 | 1 | 1,09 | 16 | 1 | 1,09 |
| 8 | 10 | 1 | 0,00 | 21 | 2 | 0,00 |
| 9 | 3 | 1 | 0,00 | 10 | 1 | 0,00 |
| 10 | 21 | 2 | 0,00 | 3 | 1 | 0,00 |
| 11 | 9 | 1 | 0,00 | 9 | 1 | 0,00 |
| 12 | 11 | 1 | 0,00 | 12 | 2 | 0,00 |
| 13 | 12 | 2 | 0,97 | 11 | 1 | 0,97 |
| 14 | 24 | 1 | 0,00 | 24 | 1 | 0,00 |
| 15 | 20 | 1 | 0,00 | 23 | 2 | 0,00 |
| 16 | 23 | 2 | 2,11 | 20 | 1 | 2,11 |
| 17 | 1 | 1 | 0,00 | 1 | 1 | 0,00 |
| 18 | 13 | 1 | 0,15 | 29 | 2 | 1,16 |
| 19 | 29 | 2 | 4,19 | 13 | 1 | 4,19 |
| 20 | 22 | 2 | 0,00 | 22 | 2 | 0,00 |
| 21 | 7 | 2 | 0,28 | 7 | 2 | 0,28 |
| 22 | 8 | 2 | 2,51 | 8 | 2 | 2,51 |
| 23 | 25 | 1 | 0,00 | 25 | 1 | 0,00 |
| 24 | 26 | 1 | 0,00 | 26 | 1 | 0,00 |
| 25 | 14 | 2 | 3,83 | 14 | 2 | 3,83 |
| 26 | 19 | 1 | 0,00 | 19 | 1 | 0,00 |
| 27 | 5 | 1 | 2,11 | 5 | 1 | 2,11 |
| 28 | 28 | 2 | 0,00 | 28 | 2 | 0,00 |
| 29 | 6 | 1 | 0,00 | 6 | 1 | 0,00 |
| 30 | 27 | 1 | 2,46 | 27 | 1 | 2,46 |

Para verificar a eficiência do método ATCTC, será utilizado um indicador de percentual de saturação. A saturação é dada pela concentração de repetições de tarefas de mesma complexidade em uma série de tarefas programadas pela regra. Ou seja: $Sat(\%) = \text{“N}^\circ \text{ de Repetições realizadas”} / \text{“N}^\circ \text{ máximo de Repetições”}$. Dessa forma, quanto maior for o percentual de saturação, maior o grau de repetitividade das tarefas e menor será a eficiência do algoritmo proposto. A tabela 6 apresenta o percentual de saturação de ambos os métodos, bem como o tempo total de atraso na realização de todas as tarefas.

Tabela 6 – Percentual de saturação das regras ATC e ATCTC

| | ATC | ATCTC |
|-------------------|------|-------|
| Sat (%) | 50% | 36% |
| Atraso (h) | 19,7 | 20,7 |

As alterações na ordem realizadas pelo método ATCTC não provocaram aumento significativo no tempo total de atraso das tarefas e aumentaram a alternância de complexidades em 17% de saturação. Ou seja, de 28 repetições de complexidade possíveis, o ATC realizou 14 contra apenas 10 repetições realizadas pelo ATCTC. Em valores absolutos, o ATCTC acrescentou apenas 1 hora na soma do tempo total de atraso, não causando alteração prática significativa na função objetivo.

5. SIMULAÇÃO

A fim de avaliar a robustez do ATCTC, realizou-se uma série de simulações com alterações nos parâmetros de processo. Foram testados 12 cenários com 200 simulações para cada cenário, onde foram testadas variações nos seguintes parâmetros: Data de Entrega, Média de Tempo de Processamento (Média p_j) e Desvio Padrão (Desvpad p_j) da distribuição normal dos tempos de processamento. Cada cenário possui um calendário de 15 dias e 30 tarefas com características variando de acordo com os parâmetros. Para cada parâmetro, foram selecionadas faixas de variação, escolhidas de acordo com as características da produção no setor farmacêutico:

Tabela 7 – Parâmetros e faixas de variação

| Parâmetros | Data de Entrega | Parâmetros | Média p_j | Desvio p_j |
|-----------------|-----------------|--------------|-------------|--------------|
| Folga | 130% | Alto | 4,00 | 0,88 |
| Nominal | 100% | Baixo | 2,00 | 0,44 |
| Reduzida | 70% | | | |

Com essa variação nos parâmetros, objetiva-se avaliar a saturação do ATCTC em comparação com o ATC, especialmente nos cenários onde as datas de entrega são reduzidas. Para realizar a simulação, determinou-se datas de entrega calculadas de acordo com um tempo médio de tempo de processamento e de desvio padrão das tarefas. A Tabela 8 apresenta o resultado médio de todos os cenários testados, indicando o tempo total de atraso e o percentual de saturação para cada uma das heurísticas. A

tabela também mostra a diferença de saturação de uma heurística para outra, de forma a entender a influência dos parâmetros no desempenho global das regras.

Tabela 8 – Simulação ATC x ATCTC

| Data de Entrega | Média p_j | DesvPad p_j | ATC | | ATCTC | | Δ SAT |
|-----------------|-------------|---------------|------------|-------|------------|-------|--------------|
| | | | Atraso (h) | SAT % | Atraso (h) | SAT % | |
| Folga | Alta | Alta | 0,0 | 43% | 0,0 | 14% | 30% |
| Folga | Alta | Baixa | 0,0 | 43% | 0,0 | 9% | 34% |
| Folga | Baixa | Alta | 0,7 | 42% | 0,7 | 21% | 21% |
| Folga | Baixa | Baixa | 0,0 | 44% | 0,0 | 14% | 30% |
| Nominal | Alta | Alta | 17,2 | 42% | 17,4 | 14% | 28% |
| Nominal | Alta | Baixa | 15,7 | 43% | 15,8 | 9% | 34% |
| Nominal | Baixa | Alta | 2,3 | 42% | 2,3 | 21% | 21% |
| Nominal | Baixa | Baixa | 0,0 | 43% | 0,0 | 14% | 29% |
| Reduzida | Alta | Alta | 441,6 | 42% | 442,2 | 32% | 10% |
| Reduzida | Alta | Baixa | 457,4 | 43% | 457,9 | 29% | 15% |
| Reduzida | Baixa | Alta | 2,6 | 42% | 2,6 | 21% | 21% |
| Reduzida | Baixa | Baixa | 0,0 | 43% | 0,0 | 14% | 28% |

Percebe-se que o ATCTC reduziu a incidência de sequencias de tarefas com complexidade igual em até 34% a mais do que o ATC, sem que isso ocasionasse aumento significativo no tempo total de atraso. Verifica-se ainda que, nos cenários onde houve maior tempo de atraso, a heurística do ATCTC registrou percentuais de variação de saturação superiores aos cenários normais, não sacrificando prazos de entrega na tentativa de alternar a complexidade das tarefas ordenadas e reduzir a saturação. A regra do ATC demonstrou desempenho similar para todos os casos, registrando em média 43% de saturação (ou seja, realizou um pouco mais da metade das alternâncias possíveis na programação das tarefas), obtendo melhores resultados com relação ao tempo total de atraso do que o ATCTC. Outra constatação interessante é que a regra do ATCTC proporciona maior saturação para tempos de processamento organizados em uma distribuição normal com menor desvio padrão.

6. CONCLUSÃO

A fim de encontrar uma solução para a programação da produção que evite repetições de tarefas de mesma complexidade, este estudo propôs a heurística chamada ATCTC, que é uma derivação da conhecida regra do ATC. Visando atender a programação de tarefas com baixo percentual de repetição (*Sat %*), o ATCTC obteve saturação menor que ATC em todos os cenários testados. O percentual de saturação do

algoritmo proposto foi em média 25% mais baixo do que o original. Conforme se objetivou, o ATCTC respeita a função objetivo da heurística em todas as situações de atraso real, não causando prejuízos significativos ao tempo total de atraso ao realizar o ordenamento das tarefas.

A busca pela excelência na preparação de *setups* e na troca rápida de ferramentas possibilita executar tarefas com mix de produção dinâmicos, reduzindo estoques e atendendo prazos mais justo. Para auxiliar nas demandas do *Lean Manufacturing* e da filosofia do *Just in Time*, o autor propõe novos estudos do ATCTC adicionando termos de regras derivadas do ATC já conhecidos, tais como o termo de *setup* e o termo de liberação de tarefas. Por se tratar de uma heurística altamente flexível, acredita-se que há um grande potencial para a sua exploração e adaptação em ambientes mais complexos. Também sugere-se um estudo mais aprofundados sobre a determinação da Constante de Complexidade (Kc), identificando faixas de utilização de acordo com o grau de impacto desejado da complexidade das tarefas sobre o ordenamento final.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAH, S.A. and HUNSUCKER, J. L. Branch and bound algorithm for the flow shop with multiple processors. *European Journal of Operations Research*, v.51, p.88-99 1991.

DRIESSEL, R. and MÖNCH, L. Variable neighborhood search approaches for scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent *setup* times, precedence constraints, and ready times. *Computers & Industrial Engineering*, v.61, p.336-345, 2011.

DU, J., LEUNG, J.Y.-T. and YOUNG, G.H. Minimizing mean flow time with release time constraint. *Theoretical Computer Science*, v.75, p.347-355, 1990.

ICHIMURA, T. The elements and functions of hierarchical scheduling system of order production. *International Journal of Production economics*, v.48, p.87-105, 1997.

JENSEN, J.B., PHILIPOOM, P.R., MALHOTRA, M.K. Evaluation of scheduling rules with commensurate customer priorities in job shops. *Journal of Operations Management*, v13, p. 213-228, 1995.

KOHLER W.H. and STEIGLITZ, K. Enumerative and iterative computational approaches. *Computer and job-shop scheduling theory*. E.G. Coffman (Ed.), Computer and job-shop scheduling theory, v. 7, John Wiley & Sons (1976), p. 229 – 287.

LAMOTHE, J., MARMIER, F., DUPUY, M., GABORIT, P. e DUPONT, L. Scheduling rules to minimize total tardiness in a parallel machine problem with *setup* and calendar constraints. *Computers & Operations Research*, v.39, p.1236-1244, 2012.

LAWRENCE, S.T. and SEWELL, E.C. Heuristic Optimal, Static, and Dynamic schedules when processing times are uncertain. *Journal of Operations Management*, v.15, p. 71 – 82, 1997.

LEE, Y.H., BHASKARAN, K. and PINEDO, M. A heuristic to minimize the total weighted tardiness with sequence-dependent *setups*. *IIE Transactions*, v.29, p.45-52, 1997.

MLADENOVIC, N., HANSEN, P. Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, v24, p. 1097 – 1100, 1997.

PARK, Y., KIM, S. Lee, Y.H.. Scheduling jobs on parallel machines applying neural network and heuristic rules. *Computers & Industrial Engineering*, v.38, p. 189 – 202, 2000.

PFUND, M. E., FOWLER, J. W., GADKARI, A. e CHEN, Y. Scheduling jobs on parallel machines with *setup* times and ready times. *Computers & Industrial Engineering*, v.38, 189-202, 2008.

PINEDO, M.L. Scheduling – Theory, Algorithms and Systems.Ed.3, Springer, New York, 2008.

RACHAMADUGU, R.V. e MORTON, T. E.. Myopic heuristics for the single machine weighted tardiness problem. *Working Paper, Carnegie Mellon University, Pittsburgh*, PA 30-82-83, 1982.

SLACK, N., CHAMBERS, S., JOHNSTON, R. *Operations Management*, Ed.2, Editora Atlas, São Paulo, 2008.

STRASSER, H. *Ergonomic efforts aiming at compatibility in work design for realizing preventive occupational health and safety. International Journal of Industrial Ergonomics*, v.16, p.211-235, 1995.

SULE, D. R. *Industrial Scheduling. PWS Publishing Company, 20 Park Plaza-Boston, MA 02116, 1996.*

TARANTILIS, C.D. and TAHON, C.. A list-based threshold accepting method for a job shop scheduling problems. *International Journal of Production Economics*, v.77, p.159-171, 2002.

VALENTE, M.S.J. and SCHALLER, J.E.. Dispatching heuristics for the single machine weighted quadratic tardiness scheduling problem. *Computer & Operations Research*, v.39, p. 2223-2231, 2012.

WISNER, J.D., and SIFERD, S.P. A survey of LIS manufacturing practices in make-to-order machine shops. *Production and Inventory Management Journal*, v.1, p.1-7, 1995.

Xi, Y. e JANG, J. Scheduling jobs on identical parallel machines with unequal future ready time and sequence dependent *setup*: An experimental study. *International Journal of Production Economics*, v.137, p.1-10, 2012.

ZHANG, R., CHANG, P. WU, C. A hybrid genetic algorithm for job shop scheduling problem with practical considerations for manufacturing costs: investigations motivated by vehicle production. *International Journal of Production Economics*, v.145, p.38-52, 2013.