

ANÁLISE DE DIFERENTES TÉCNICAS DE SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO EM UM AMBIENTE DE PRODUÇÃO PARA ESTOQUE CONTROLADO PELO SISTEMA TPC-S

Isidoro Rays Filho (Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Engenharia de Produção, Faculdade de Engenharia – Câmpus de Bauru), isidoro.rays@unesp.br

Fernando Bernardi de Souza (Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Engenharia de Produção, Faculdade de Engenharia – Câmpus de Bauru), fernando.bernardi@unesp.br

Lucas Martins Ikeziri (Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Engenharia de Produção, Faculdade de Engenharia – Câmpus de Bauru; Centro Universitário Sagrado Coração – UNISAGRADO, Área de Ciências Exatas e Aplicadas), lucas_ikeziri@outlook.com



Em ambientes produtivos para estoque (Make-to-Stock), é comum se deparar com alguns desafios, como baixa rotatividade e altos investimentos em estoques, rupturas, vendas perdidas e alta obsolescência do estoque. Para lidar com esses obstáculos, a Teoria das Restrições (Theory of Constraints - TOC) foca no fluxo e, se não houver indícios de mudanças na demanda, deve-se repor a quantidade vendida, assumindo um compromisso com o mercado. Para tanto, quando o recurso restritivo tem capacidade estritamente superior à demanda, a TOC propõe um sistema de planejamento e controle da produção chamado Tambor-Pulmão-Corda Simplificado (TPC-S) que, aplicado em um ambiente Make-to-Stock, recebe o nome de make-to-availability (GP) e uma forma de sequenciamento, monitoramento e controle chamado Gerenciamento do Pulmão (GP). Com a finalidade de avaliar o desempenho do GP frente a outras regras de sequenciamento, tais como o FIFO (First-In-First-Out), o SPT (Sortest-Process-Time) e o IFA (Índice de Falta), mensurando o desempenho pelo indicador Fill Rate, foi construído um modelo no software Anylogic que representa uma linha de produção fictícia, simulando diferentes cenários. Os resultados permitem concluir que a regra do GP permite aumentar o desempenho do sistema.

Palavras-chave: Teoria das Restrições, Sequenciamento, Simulação, Produzir para disponibilidade, Gerenciamento do pulmão.

1. Introdução

Estoque configura-se um investimento e, como tal, está sujeito a riscos. Uma forma de minimizar esses riscos seria as empresas iniciarem a produção somente mediante a um pedido firme, ou seja, operarem em ambientes *Make-to-Order* (MTO). Entretanto, situações de demandas sazonais, em que os picos de vendas podem superar a capacidade de atendimento da fábrica, e/ou quando os prazos de entrega das empresas superam os tempos de tolerância dos clientes, fazem com que seja necessário manter estoque de produtos acabados para entrega imediata para o cliente, ou seja, operar sob a estratégia *Make-to-Stock* (MTS). Toda via, em tal ambiente, as empresas podem se defrontar com baixa rotatividade e altos investimentos em estoques, rupturas, obsolescência e vendas perdidas (SOUZA; PIRES, 2014).

Para superar esses obstáculos, a Teoria das Restrições (*Theory of Constraints* - TOC) propõe que se deve focar no fluxo de produção, operando com tempos de reabastecimento curtos e consequentes e com baixos níveis de estoques. O reabastecimento deve responder à demanda real, os recursos com restrição de capacidade (RRC) devem ser monitorados e a disponibilidade de produtos acabados protegida contra as flutuações estatísticas dos recursos fabris (E. SCHRAGENHEIM, 2013b).

Quando a restrição organizacional é interna, como uma máquina, tem-se a presença de um RRC ativo. O método do tambor pulmão corda (TPC), em sua forma clássica ou convencional, visa extrair o máximo de sua capacidade, maximizando os resultados da empresa. Entretanto, se a demanda é a restrição do sistema, ou seja, tem-se capacidade protetiva (excedente) em todos os recursos do sistema produtivo. Nestes casos, uma estratégia mais efetiva é a utilização do método TPC simplificado (TPC-S), o qual parte do pressuposto de que mesmo o RRC tem capacidade estritamente superior à demanda (E. SCHRAGENHEIM, 2013a; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SOUZA; BAPTISTA, 2010).

Em ambientes MTS, a TOC propõe assumir um compromisso assumido com alguns clientes específicos (ou com todo o mercado) de assegurar uma disponibilidade boa o suficiente de tal forma que, recebido um pedido, este seja atendido imediatamente (E. SCHRAGENHEIM, 2013b). Por essa razão, tal sistema recebe o nome de *Make-to-Availability* (MTA) e pode ser compreendido, portanto, como um caso especial do MTS.

Para ambas as formas de planejamento, TPC e TPC-S aplicados em ambientes MTO e MTA, o método de controle e sequenciamento da produção proposto é o gerenciamento do pulmão (GP). Entretanto, devido ao planejamento do TPC-S ser mais simples que o do TPC clássico, a execução do plano, e conseqüentemente as regras de sequenciamento da produção

recomendadas pelo GP, assumem um papel de maior relevância (E. SCHRAGENHEIM, 2013a), pois deve lidar com os erros de previsão, ineficiências e outras as flutuações estatísticas para garantir a disponibilidade, proteger as vendas e evitar rupturas de estoque (CORRÊA; GIANESI; CAON, 2019; SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009; CORRÊA; CORRÊA, 2010).

Ikeziri et al. (2019), após realizarem uma revisão da literatura dos temas relacionados com a TOC, afirmam que, apesar de se tratar de um tema importante, a efetividade das regras de sequenciamento baseadas no método GP foi pouco estudada, representando uma oportunidade para futuras pesquisas. Para os autores, somente dois artigos foram encontrados na literatura que abordaram esse tema. Castro e Godinho Filho (2020) compararam as regras de sequenciamento das ordens de produção FIFO, GP e um método baseado na meta heurística *particle swarm optimization* (PSO) para avaliar o desempenho destas regras frente a presença de setups dependentes e Thürer e Stevenson (2018) compararam o método de controle proposto pela TOC com outras regras de sequenciamento planejadas pelo TPC em ambiente MTO. Entretanto, nenhum estudo encontrado comparou diferentes regras de sequenciamento com o GP em ambientes MTS (ou MTA) planejados pelo método TPC-S.

Nesse contexto, a presente pesquisa tem como motivação responder ao seguinte problema: quando comparado com outras regras de sequenciamento mais convencionais, o método GP é o método mais efetivo para garantir disponibilidade de produtos acabados para pronta-entrega em um ambiente TPC-S/MTA? Para tanto, utilizar-se-á a simulação computacional para comparação do GP com outras regras de sequenciamento consideradas mais convencionais em diferentes cenários de simulação.

2. Revisão bibliográfica

Nesta seção é apresentada uma revisão teórica sobre o sistema TPC-S/MTA, seu método de controle da produção e sequenciamento da produção.

2.1. O TPC-S em ambientes MTA

Schrageheim, Dettmer e Patterson (2009) estabelecem quatro passos para a implementação do TPC-S em ambientes MTA, que são:

1. Determinar o estoque alvo do sistema (*Target Level* - TL) inicial. O TL inicial pode ser obtido de duas formas diferentes. Uma delas é a demanda máxima ponderada por um tempo de reposição confiável. A outra é a demanda média multiplicado por um tempo de reposição acrescido de um fator de segurança;

2. A geração de ordens de produção. Com a finalidade de se manter o estoque do sistema próximo ao TL, quando o estoque do sistema for menor que o TL, emite-se uma ordem de produção com o valor máximo entre a quantidade necessária para reestabelecer o TL no sistema e o lote mínimo (definido para evitar setups excessivos que comprometam a capacidade protetiva dos recursos fabris). Além disso, pode-se considerar a Carga Planejada no RRC para balizar a liberação de ordens;
3. O gerenciamento do pulmão (GP). O GP é o mecanismo proposto pela TOC para controlar a produção e estabelecer as prioridades das ordens de produção em função de sua penetração no pulmão ou SP_O (*Status do Pulmão*). Sendo assim, considerando o estoque em processo (*work in process – WIP*) e o *finished goods inventory* (FGI), a priorização das ordens de produção pode ser calculada da seguinte forma:

$$SP_O = \frac{TL - WIP - FGI}{Target Level} \quad (1)$$

O SP_O é classificado em três zonas caracterizadas por cores distintas: verdes, quando o SP_O é menor que um terço; amarela, quando está entre um e dois terços (devendo as ordens serem monitoradas); e vermelha, acima de dois terços, devendo elas serem apressadas, pois há risco de atraso;

4. Assegurar que o TL esteja em um nível correto. O TL pode tornar-se impreciso, decorrente tanto de uma estimativa inicial incorreta, quanto de mudanças internas e/ou externas. Logo, é necessário ajustá-lo. Portanto, quando o TL está muito baixo (as ordens ficam muito tempo na região vermelha) é necessário que ele seja aumentado. Da mesma forma, quando as ordens permanecem por muito tempo na região verde, é necessário que o TL seja diminuído.

2.2. Gerenciamento dinâmico do pulmão

O gerenciamento dinâmico do pulmão (GDP) é o método proposto pela TOC para manter o TL em um nível correto, ou seja, que as ordens de produção não permaneçam demasiadamente na região verde (excesso de proteção), nem na região vermelha (podendo gerar rupturas). O SP_d

para o cálculo do GDP é expresso pela penetração do FGI no TL vigente ou, em termos matemáticos, como:

$$SP_d = \frac{TL - FGI}{Target Level} \quad (2)$$

Quando o TL for muito alto, pela lógica de “emissão” de ordens, o estoque de produtos acabados ficará alto, pois está sendo demandado um valor relativamente baixo dos produtos. Logo, tem-se uma baixa penetração no TL, ficando o estoque de produtos acabados alto quando comparado ao TL (sinalizando um status verde). Se isso ocorrer por um intervalo de tempo relativamente grande, tem-se uma situação verde em demasia (*Too Much Green - TMG*). Já, se o TL for muito baixo, está sendo demandado um valor relativamente alto dos produtos acabados. Portanto, o FGI ficará muito baixo em comparação com o TL, sinalizando uma alta penetração no pulmão. Se essa situação ocorrer por um intervalo de tempo relativamente grande, tem-se uma situação vermelha em demasia (*Too Much Red - TMR*). Logo, no GDP, há dois parâmetros fundamentais que devem ser parametrizados. O primeiro deles é o intervalo de tempo que se considera para determinar um TMG ou um TMR. Já o segundo fator é em quanto aumentar o TL (no caso do TMR) ou diminuir o TL (no caso de um TMG) (E. SCHRANGENHEIM, 2013; SOUZA; PIRES, 2014).

2.3. Sequenciamento da produção

O sequenciamento da produção é a decisão da ordem em que as tarefas serão realizadas, definida por uma prioridade estabelecida de acordo com regras predefinidas, visando atingir um conjunto de objetivos de desempenhos (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009). Dentre as regras presentes em Silva et al. (2012) Slack, Chambers e Johnston (2009), Tubino (2009), destacam-se aqui aquelas que não utilizam datas em seus cálculos e que, portanto, podem ser aplicadas para sequenciar ordens de reposição de produtos finais:

- FIFO (*First-In-First-Out*): a ordem é processada com base na sua chegada, ou seja, a primeira ordem a chegar é a primeira a ser processada;
- LIFO (*Last-In-First-Out*): as ordens também são processadas de acordo com sua chegada, entretanto, diferencia-se da FIFO no sentido que as ordens que chegam por último são processadas primeiro;

- SPT (*Shortest-Processing-Time*): as prioridades são definidas pelo menor tempo de processamento total, ou seja, elas são executadas de forma inversa ao tempo de processamento restante;
- IFA (índice de falta): o índice de falta é calculado pela razão entre quantidade de FGI sobre taxa de demanda.

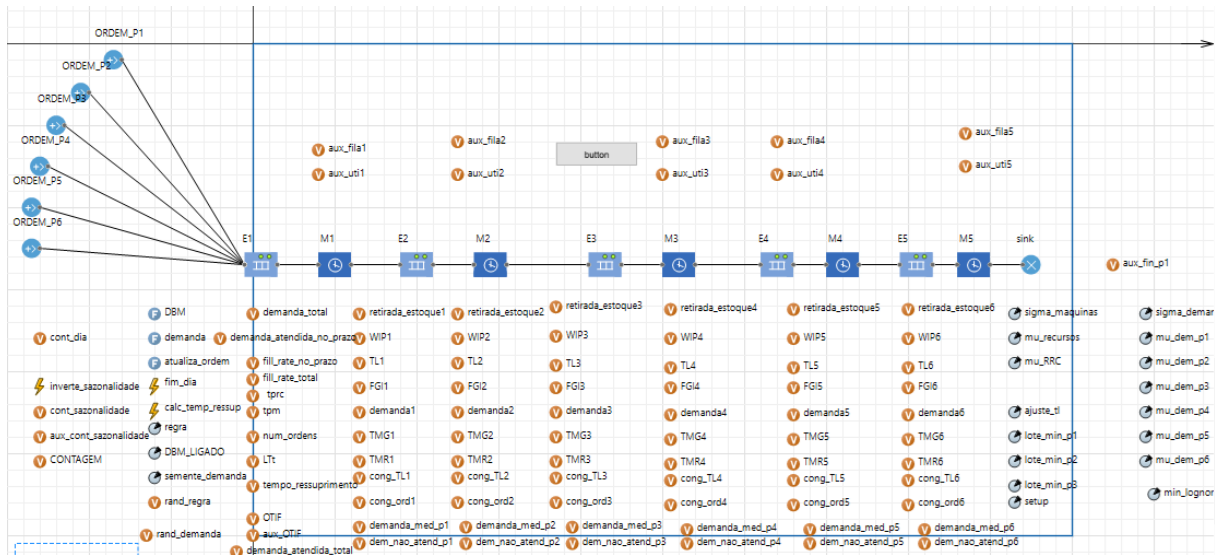
3. Simulação

Para comparar diferentes técnicas de sequenciamento em um ambiente de produção para estoque, utilizou-se a simulação, uma vez que um modelo desenvolvido, avaliado e testado corretamente permite desenvolver novas teorias e ampliar o conhecimento sobre teorias existentes, investigando inúmeros aspectos sobre sistemas reais (DAVIS; EISENHARDT; BINGHAM, 2007; BANKS et al., 2004).

3.1. Construção do modelo

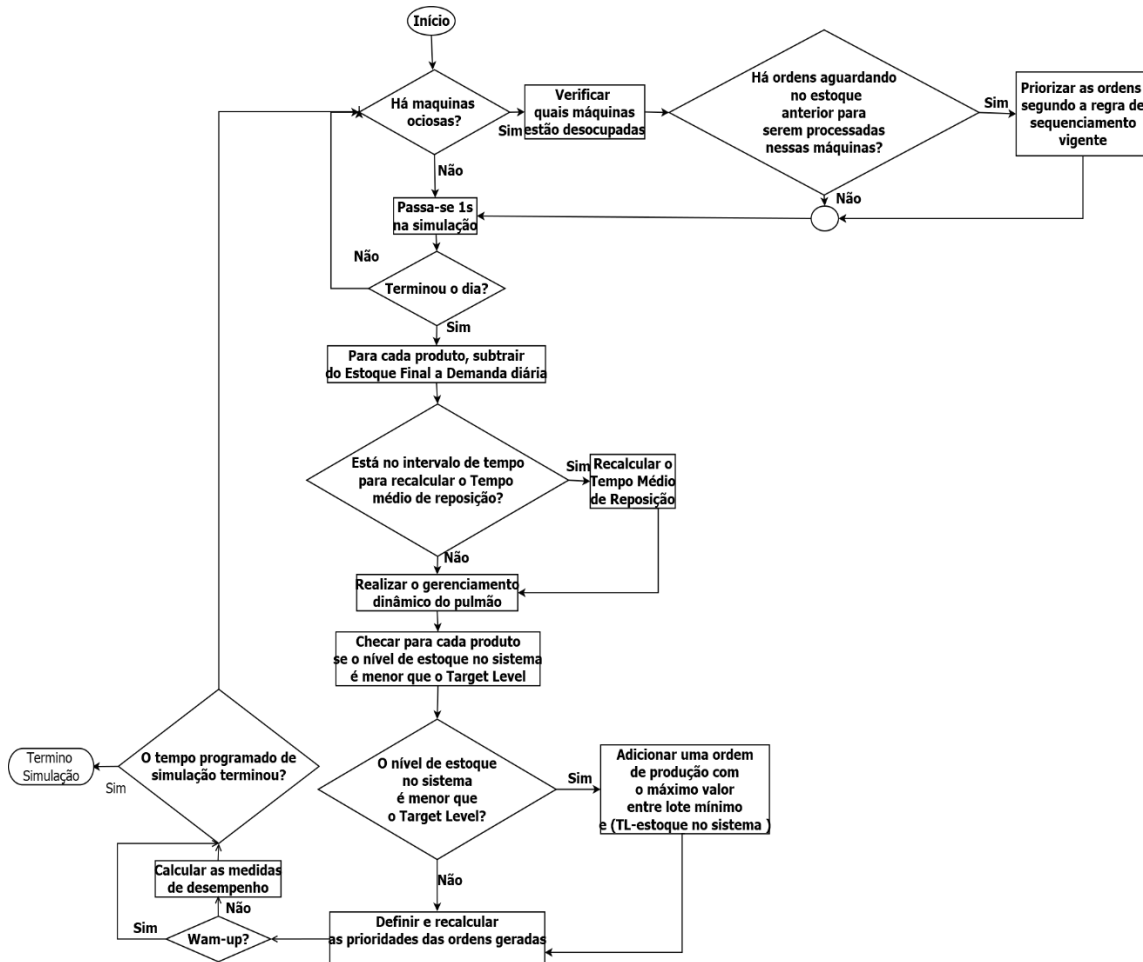
O modelo foi construído no software Anylogic, sendo composto por cinco máquinas que produzem seis produtos, conforme Figura 1. A lógica por detrás do modelo é expressa pelo fluxograma da Figura 2.

Figura 1 – Representação do modelo no Anylogic



Fonte: O Autor

Figura 2 – Representação da lógica computacional do modelo



Fonte: O Autor

Foram avaliadas cinco regras de sequenciamento diferentes, assim sendo, em cada cenário proposto há cinco variáveis a serem analisadas. A medida utilizada para avaliar as regras de sequenciamento foi o *Fill Rate* (FR), a qual é uma medida do nível de serviço da empresa que mensura o desempenho da gestão de estoque. O FR é calculado pela seguinte fórmula:

$$FR = \frac{\sum_{t=1}^T DAPt}{\sum_{t=1}^T Dt} \quad (3)$$

Onde DAP_t é a demanda atendida no prazo no dia t e D_t é a demanda no dia t (LARSEN; THORSTENSON, 2014; KLEIJNEN; SMITS, 2003).

Para verificação do modelo, foi construído de um modelo visual em 2D no software, criando o estoque, as máquinas e as ordens de produção sendo mostradas na tela, tais como sequência, produto, quantidade, valor da regra, *target level*, pausando-se o modelo nos momentos em que a ação aconteceria, validando o sistema de forma visual. A primeira verificação foi a geração das ordens de produção, qual seja, caso o estoque no sistema de um determinado produto seja menor que o TL, deve-se emitir uma ordem de produção para repor o TL. A segunda verificação foi o funcionamento das regras de sequenciamento, em que se visualizou o estoque físico das ordens, o cálculo de valores numéricos associados às regras, quais ordens eram carregadas nas máquinas e se eram compatíveis com a regra vigente. A terceira verificação foi o GDP, que deveria disparar ajustes no TL no momento certo e nas quantidades corretas.

3.2. Planejamento do experimento

A fim de comparar as regras de sequenciamento, foram simuladas cargas de 80% e 95% no RRC da fábrica (máquina 3 da simulação), enquanto os demais recursos tiveram suas cargas mantidas em 70% (quando a carga do RRC estava em 80%) ou 85% (quando a carga do RRC estava em 95%). Além disso, para simular a variabilidade na demanda e nos recursos internos, foi-se escolhido a distribuição estatística lognormal. Com base em Hopp e Spearman (2013), foram estabelecidos dois níveis de variabilidade: alta ($CV=1,5$) e baixa ($CV=0,3$), em que o CV é obtido pelo desvio-padrão dividido pela média da distribuição. Tais níveis foram definidos tanto para a demanda quanto para os tempos de processamento dos recursos, de tal modo que as médias nos tempos de processamento e na demanda permanecessem os mesmos. Os parâmetros do GDP foram estabelecidos de forma que proporcione um ajuste de 15% no TL caso o FGI permanecesse durante três tempos de ressuprimento nas regiões verde (com recomendação de redução do TL) ou vermelha (com recomendação de aumento do TL), recalculando o tempo de ressuprimento a cada 15 dias na simulação. Um resumo dos cenários pode ser visto na Tabela 3. Além disso, foram simulados dois tipos de urgência de ordem nas regras SPT: i) quando o $FGI=0$, as ordens recebem alta prioridade (SPTR) e ii) quando o estoque à frente da ordem for menor que $1/3$ do TL, ela também recebe alta prioridade (SPTRD). Tais “urgências” foram implementadas para evitar que ordens grandes aguardassem muito tempo nas filas.

Tabela 3 – Resumo dos cenários simulados

CENÁRIO	CARGA	CV RECURSOS	CV DEMANDA	MU RRC	MU RECURSOS	MU P1	MU P2	MU P3	MU P4	MU P5	MU P6
1	85 / 70	0,50	0,50	5,45	5,25	2,18	2,87	3,79	4,48	3,28	4,12
2	85 / 70	0,50	1,50	5,45	5,25	1,79	2,49	3,40	4,10	2,89	3,74
3	85 / 70	1,50	0,50	4,98	4,78	2,18	2,87	3,79	4,48	3,28	4,12
4	85 / 70	1,50	1,50	4,98	4,98	1,71	2,40	3,32	4,01	2,81	3,65
5	95 / 85	0,50	0,50	5,56	5,44	2,18	2,87	3,79	4,48	3,28	4,12
6	95 / 85	0,50	1,50	5,56	5,44	1,79	2,49	3,40	4,10	2,89	3,74
7	95 / 85	1,50	0,50	5,09	4,98	2,18	2,87	3,79	4,48	3,28	4,12
8	95 / 80	1,50	1,50	5,09	4,98	1,71	2,40	3,32	4,01	2,81	3,65

Fonte: O Autor

Por fim, para a realização efetiva da simulação, foram definidos três importantes parâmetros: número de replicações a serem executadas, *warm-up* (período de “aquecimento” do sistema, ou seja, tempo de rodagem da simulação que não é considerado na apuração dos resultados, sendo destinado a estabilizar o sistema) e tempo de simulação. O número de replicações foi obtido do método de intervalo de confiança, que consiste em realizar simulações até que o intervalo de confiança da medida da simulação tenha o nível de significância desejado (ROBINSON, 2004). A replicação de cada cenário 150 vezes se mostrou adequada, pois nenhuma regra superou um nível de significância de 5%.

Já a duração da simulação foi de três anos e seis meses e o cálculo do *warm-up* foi calculado com base na fórmula do *marginal standard error rule (MSER)* (ROBINSON, 2004), simulando 20 vezes cada cenário e coletando o FR para cada regra. Nenhuma das regras superou 180 dias de *warm-up* necessário. O tempo efetivo de simulação foi estabelecido como o equivalente de três anos de geração de dados.

4. Resultados e discussão

Após a realização das simulações, os resultados médios obtidos para cada uma das regras podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 – FR médio das regras nos cenários simulados

CENÁRIO	CARGA	CV RECURSOS	CV DEMANDA	IFA	GP	FIFO	SPTR1 (0.33)	SPTR2 (0.33)	SPTR1 (FGI=0)	SPTR2 (FGI=0)
1	85/70	0,5	0,5	99,788	99,887	99,793	99,729	99,729	99,784	99,763
2	85/70	0,5	1,5	99,683	99,670	99,542	99,569	99,539	99,126	99,021
3	85/70	1,5	0,5	89,408	96,870	92,410	94,787	94,096	80,183	79,671
4	85/70	1,5	1,5	88,967	96,451	92,190	93,001	94,039	79,438	78,818
5	95/85	0,5	0,5	99,390	99,813	99,646	99,338	99,406	97,448	96,785
6	95/85	0,5	1,5	99,113	99,520	99,183	98,706	98,540	95,617	94,877
7	95/85	1,5	0,5	74,583	83,205	76,677	80,417	80,577	64,567	64,339
8	95/80	1,5	1,5	73,493	81,503	75,873	79,974	80,490	63,817	62,926

Fonte: O Autor

A fim de verificar a normalidade dos dados, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk. Considerando

um nível de significância de 5%, em todas as situações ao menos uma regra não apresentou normalidade. Assim sendo, para comparar as regras de sequenciamento, foi necessário realizar testes não paramétricos. Conforme pode ser visto na Tabela 5, utilizando um nível de significância de 5%, houve diferença estatística significativa em todos os cenários.

Tabela 5 – Testes estatísticos de Shapiro Wilk e Friedman

CENÁRIO	SHAPIRO WILK (NORMALIDADE)							FRIEDMAN
	IFA	GP	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTRD1	SPTRD2	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2,2E-16
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2,2E-16
3	0.0009	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2,2E-16
4	0.0015	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2,2E-16
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2,2E-16
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0095	0.0	2,2E-16
7	0.2153	0.0707	0.0882	0.0147	0.0005	0.0	0.0005	2,2E-16
8	0.8047	0.5627	0.8378	0.0346	0.0168	0.0	0.0168	2,2E-16

Fonte: O Autor

Portanto, na sequência, realizou-se o teste post-hoc de Nemenyi com ajuste de Bonferroni, que se configura um teste adequado após verificado diferença entre as medianas (SHANG,2015; RIBEIRO,2021).

Tabela 6 – Teste estatístico de Nemenyi com ajuste de Bonferroni

CENARIO 1							CENARIO 2						
	IFA	GP	FIFO	SPTR1D	SPTR2D	SPTR1		IFA	GP	FIFO	SPTR1D	SPTR2D	SPTR1
GP	7.8e-14	-	-	-	-	-	GP	100.000	-	-	-	-	-
FIFO	0.14258	5.1e-10	-	-	-	-	FIFO	0.50469	0.57774	-	-	-	-
SPTR1D	0.00014	< 2e-16	4.1e-11	-	-	-	SPTR1D	0.00313	0.00471	0.47760	-	-	-
SPTR2D	0.22815	< 2e-16	2.2e-05	0.31832	-	-	SPTR2D	0.01289	0.01846	0.73588	0.99973	-	-
SPTR1	3.1e-06	0.00141	0.09608	7.9e-14	7.2e-13	-	SPTR1	7.3e-09	1.5e-08	0.00021	0.15650	0.05801	-
SPTR2	1.1e-07	0.01289	0.01690	6.7e-14	8.9e-14	0.99712	SPTR2	1.7e-13	2.0e-13	3.7e-08	0.00076	0.00013	0.67658
CENARIO 3							CENARIO 4						
	IFA	GP	FIFO	SPTR1D	SPTR2D	SPTR1		IFA	GP	FIFO	SPTR1D	SPTR2D	SPTR1
GP	7.4e-14	-	-	-	-	-	GP	6.5e-14	-	-	-	-	-
FIFO	0.0073	2.9e-05	-	-	-	-	FIFO	0.04607	5.9e-07	-	-	-	-
SPTR1D	1.1e-05	0.0141	0.7600	-	-	-	SPTR1D	0.00025	0.00064	0.80511	-	-	-
SPTR2D	1.7e-05	0.0107	0.8051	10.000	-	-	SPTR2D	9.6e-06	0.00888	0.37384	0.99417	-	-
SPTR1	2.4e-10	< 2e-16	6.9e-14	< 2e-16	< 2e-16	-	SPTR1	5.1e-10	< 2e-16	5.0e-14	3.9e-14	< 2e-16	-
SPTR2	2.0e-10	< 2e-16	6.6e-14	< 2e-16	< 2e-16	1	SPTR2	9.6e-11	< 2e-16	6.4e-14	9.3e-15	< 2e-16	0.99998
CENARIO 5							CENARIO 6						
	IFA	GP	FIFO	SPTR1D	SPTR2D	SPTR1		IFA	GP	FIFO	SPTR1D	SPTR2D	SPTR1
GP	7.5e-14	-	-	-	-	-	GP	0.096	-	-	-	-	-
FIFO	0.00012	0.00268	-	-	-	-	FIFO	1.000	0.072	-	-	-	-
SPTR1D	0.71095	6.4e-14	2.4e-08	-	-	-	SPTR1D	0.022	6.5e-08	0.031	-	-	-
SPTR2D	0.96865	7.4e-14	1.0e-06	0.99585	-	-	SPTR2D	0.004	3.1e-09	0.006	0.999	-	-
SPTR1	2.0e-06	< 2e-16	6.6e-14	0.00297	0.00021	-	SPTR1	3.4e-14	< 2e-16	6.2e-14	1.9e-13	3.5e-12	-
SPTR2	1.3e-08	< 2e-16	6.3e-14	7.6e-05	3.1e-06	0.98019	SPTR2	< 2e-16	< 2e-16	< 2e-16	8.2e-14	5.8e-14	0.846
CENARIO 7							CENARIO 8						
	IFA	GP	FIFO	SPTR1D	SPTR2D	SPTR1		IFA	GP	FIFO	SPTR1D	SPTR2D	SPTR1
GP	6.2e-14	-	-	-	-	-	GP	9.6e-14	-	-	-	-	-
FIFO	0.72766	3.7e-11	-	-	-	-	FIFO	0.26070	1.1e-07	-	-	-	-
SPTR1D	3.2e-07	0.05377	0.00072	-	-	-	SPTR1D	1.1e-09	0.71935	0.00034	-	-	-
SPTR2D	2.3e-07	0.06253	0.00057	100.000	-	-	SPTR2D	7.9e-11	0.90673	5.9e-05	0.99978	-	-
SPTR1	1.0e-13	< 2e-16	5.3e-14	< 2e-16	< 2e-16	-	SPTR1	2.1e-11	< 2e-16	6.5e-14	< 2e-16	< 2e-16	-
SPTR2	9.1e-14	< 2e-16	8.6e-14	< 2e-16	< 2e-16	100.000	SPTR2	2.3e-13	< 2e-16	5.4e-14	< 2e-16	< 2e-16	0.99631

Fonte: O Autor

Analisando-se as Tabelas 4 e 6, pode-se observar que aumentos nas cargas dos recursos (de 85% para 95% no RRC e de 70% para 85% nas demais máquinas) fazem com que o FR caia, uma vez que se diminui a capacidade protetiva dos recursos, prejudicando a disponibilidade e entrega de produtos para o cliente. Como os aumentos na variabilidade da demanda e das máquinas foram obtidos mantendo a média dos tempos de processamento e dos produtos iguais, (independente da variabilidade ser alta ou baixa, a média permaneceu a mesma), foi possível analisar outra situação: aumentos na variabilidade, tanto externa (dos consumidores) quanto interna (dos recursos), prejudicam o sistema como um todo. Assim sendo, reforça-se aquilo já é reconhecido pela literatura: independentemente da regra de sequenciamento adotada, quanto menor a variabilidade, melhor o desempenho do sistema produtivo. Como ações internas, podem-se realizar projetos de melhoria apoiados por técnicas *Lean Six Sigma*, planos de manutenção preditiva e preventiva, etc.. Para lidar com a variabilidade externa, buscar reposições frequentes, evitando pedidos grandes que podem bloquear o fluxo dos demais produtos, pode ser uma alternativa.

Analisando-se as regras de sequenciamento, a regra GP apresenta o melhor FR em praticamente todos os cenários simulados, com diferença estatística em relação à regra IFA nos cenários 1, 3, 4, 5, 7 e 8; em relação à regra FIFO nos cenários 1, 3, 4, 5, 7 e 8; em relação à regra SPTRDs (com urgência $1/3$ TL) nos cenários 1, 2, 3, 4, 5 e 6 e quanto à regra SPTRs (com urgência $FGI=0$), em todos os cenários. O bom desempenho da regra FIFO em relação às outras regras, especialmente nos cenários de baixa variabilidade (1 e 5), é oriundo da efetividade do planejamento. Ou seja, nesses cenários tem-se baixa variabilidade e há poucos desvios do planejamento, fazendo-se necessários poucos ajustes ao plano. Os desempenhos menores das regras IFA e SPTRs podem ser explicados pelas suas incompatibilidades com a proposta do TPC-S em ambientes MTA. Por exemplo, quando é emitida uma ordem de produção para o chão de fábrica, ela é emitida pela quantidade necessária para repor o TL. Quando há uma retirada maior dos produtos, a ordem emitida é maior, e as regras baseadas em SPTR tendem a priorizar as ordens com o menor tempo de processamento e, conseqüentemente, de menor urgência em termos garantia de disponibilidade de produtos acabados. Tal situação é mitigada quando se estabelece urgência às ordens com $1/3$ do TL, o que pode ser observado em todos os cenários, exceto o número 1.

Já a regra IFA, por focar apenas o estoque final e a taxa da demanda, pode inadequadamente considerar as situações em que há mais de uma ordem para cada produto no chão de fábrica. Por exemplo, se o *lead time* for três dias e uma ordem é emitida para repor os estoques do dia anterior, ter-se-iam 18 ordens de produção no chão de fábrica (três para cada um dos seis produtos). A regra GP consideraria a penetração no TL dessas ordens, sequenciando-as em função da quantidade de WIP e FGI comparada com o TL. A regra FIFO manteria a sequência de liberação das ordens resultante da aplicação do método MTA. Porém, se em um determinado dia a relação FGI /taxa da demanda for 0,15; 0,14; 0,13; 0,12; 0,11 e 0,10 para P1, P2, P3, P4, P5 e P6, respectivamente, e ainda, se fosse possível produzir 10 ordens nesse dia em uma determinada máquina, seriam priorizadas três ordens de P6, três de P5, três de P4 e uma de P3, com riscos evidentes de ruptura do estoque de produtos acabados de P2 e P1. Além disso, a relação FGI /taxa da demanda só seria atualizada quando as ordens de produção fossem concluídas ou após consumo de FGI , ou seja, poderia haver uma priorização incorreta das ordens até que a última operação seja concluída e o estoque de produtos acabados seja atualizado.

5. Considerações finais

O presente trabalho, por meio da construção de um modelo computacional no software Anylogic, permitiu simular uma fábrica com cinco recursos e que produz seis tipos diferentes de produtos. Foram criados oito cenários - com dois níveis de carga sobre a fábrica, dois níveis de variabilidade da demanda e dois níveis de variabilidade de tempos de processamento -. cada um deles replicado 150 vezes. O desempenho de cada regra de sequenciamento foi avaliado pelo indicador *Fill Rate*. Por meio do software R, foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, com um nível de significância de 5%, observando-se, em grande parte dos resultados, a ausência de normalidade. Fez-se então necessária a utilização do teste não paramétrico de Friedman e Nemenyi, com ajuste de Bonferroni, que permitiu a comparação entre as regras (par a par) em cada cenário. Os resultados permitiram concluir que i) aumentos na variabilidade do sistema, tanto externa (demanda) quanto interna (recursos) e aumentos na utilização dos recursos fazem com que o desempenho do sistema caia; ii) a regra de sequenciamento baseada no GP permitiu um *Fill Rate* superior às demais regras em quase todos os cenários.

Como limitações dessa pesquisa, tem-se a simplicidade do cenário simulado e a fixação de um parâmetro no GDP (ajuste de 15%, para mais ou para menos, quando FGI permanece nas regiões verde ou vermelha durante um período equivalente a três tempos de ressuprimento). Logo, pesquisas futuras poderiam dedicar-se à simulação de ambientes de produção mais complexos, com mais produtos e operações, incluindo operações de montagem, e permitindo outras configurações de parâmetros do GDP.

REFERÊNCIAS

BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event system simulation**. Hoboken: Prentice Hall, 2004.

CASTRO, Robson Flavio; GODINHO-FILHO, Moacir; TAVARES-NETO, Roberto Fernandes. Dispatching method based on particle swarm optimization for make-to-availability. **Journal of Intelligent Manufacturing**, p. 1-10, 2020.

CORRÊA, Henrique L.; GIANESI, Irineu GN; CAON, Mauro. **Planejamento, programação e controle da produção**. São Paulo: Atlas, v. 6, 2019.

CORRÊA, Henrique Luiz; CORRÊA, Carlos Alberto. **Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

DAVIS, J. P.; EISENHARDT, K. M.; BINGHAM, C. B. Developing theory through simulation methods. **Academy of Management Review**, v. 32, n. 2, p. 480-499, 2007.

GOLDRATT, Eliyahu M.; COX, Jeff. **A meta: um processo de melhoria contínua**. São Paulo: Nobel, 2003.

HOPP, Wallace J.; SPEARMAN, Mark L.; MIGLIAVACCA, Paulo Norberto. **A ciência da fábrica**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

IKEZIRI, Lucas Martins et al. Theory of constraints: review and bibliometric analysis. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 15-16, p. 5068-5102, 2019.

KLEIJNEN, J. P. C.; SMITS, M. T. Performance metrics in supply chain management. **Journal of the Operational Research Society**, v. 54, n. 5, p. 507-514, 2003.

LARSEN, C.; THORSTENSON, A. The order and volume fill rates in inventory control systems. **International Journal of Production Economics**, v. 147, p. 13-19, 2014

SCHRAGENHEIM, E. **Gerenciamento da produção para estoque e o conceito de produção sob disponibilidade**. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Orgs.). Handbook da Teoria das Restrições. Tradução de Beth Honorato, revisão técnica de Daniel Pacheco Lacerda et al. 1 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. cap. 10, p. 246-273.

SCHRAGENHEIM, E. **Gerenciamento da produção para estoque e o conceito de produção sob disponibilidade**. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Orgs.). Handbook da Teoria das Restrições. Tradução de Beth Honorato, revisão técnica de Daniel Pacheco Lacerda et al. 1 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. cap. 9, p. 218-245.

SCHRAGENHEIM, Eli; DETTMER, H. William; PATTERSON, J. Wayne. **Supply chain management at warp speed: Integrating the system from end to end**. Boca Raton: CRC Press, 2009.

SILVA, E. B. da; COSTA, M. G.; SILVA, M. F. S. da; PEREIRA, F. H. Avaliação de regras de sequenciamento da produção em ambientes Job shop e Flow shop por meio de simulação computacional. **Exacta**, v. 10, n. 1, 2012, pp. 70-81.

SLACK, Nigel et al. **Administração da produção**. São Paulo: Atlas, 2009.

SOUZA, F. B.; BAPTISTA, H. R. Proposta de avanço para o método Tambor-Pulmão Corda Simplificado aplicado em ambientes de produção sob encomenda. **Gestão & Produção**, v. 17, n. 4, p. 735-746, 2010.

SOUZA, F. B.; PIRES, S. R. I. Produzindo para disponibilidade: uma aplicação da Teoria das Restrições em ambientes de produção para estoque. **Gestão & Produção**, v. 21, p. 65-76, 2014.

THÜRER, Matthias; STEVENSON, Mark. On the beat of the drum: improving the flow shop performance of the Drum–Buffer–Rope scheduling mechanism. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 9, p. 3294-3305, 2018.

TUBINO, D. F. **Planejamento e Controle da Produção: teoria e prática**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2009.

ROBINSON, Stewart. **Simulation: the practice of model development and use**. Chichester: Wiley, 2004.

SHANG, Han Lin. Statistically tested comparisons of the accuracy of forecasting methods for age-specific and sex-specific mortality and life expectancy. **Population Studies**, v. 69, n. 3, p. 317-335, 2015.

RIBEIRO, Gabriel Trierweiler et al. Novel hybrid model based on echo state neural network applied to the prediction of stock price return volatility. **Expert Systems with Applications**, v. 184, p. 115490, 2021.