

Método de ranqueamento de filas aplicado ao setor de fundição

Julia Eunice, Karoline Santos, Pâmela Cruz, Vitor Rizzardo, Shih Yung Chin

Resumo: O presente artigo tem como objetivo sugerir uma forma de ranqueamento para filas entre processos no setor de fundição, em especial da macharia para a fundição. A fim de se obter um meio de aumentar a produtividade do setor, que possui problemas recorrentes de volumosas filas e falta de agilidade no atendimento dos clientes. Este artigo propõe uma ordenação do atendimento dos lotes pelo setor de fundição, tendo em vista o lucro e o tempo de processamento. Para isso utilizou-se de metodologias como Teoria da Fila, Cadeia de Markov e Simulação de Monte Carlo, o que possibilitou propor como melhoria a reorganização dos atendimentos e por meio da análise de indicadores como lucro por hora, constatou-se que ao priorizar o atendimento dos lotes com menor tempo de processamento aumenta-se o lucro por hora e aumenta o número de atendimentos por turno.

Palavras chave: Fundição, Ranqueamento, Teoria das Filas, Cadeia de Markov, Simulação de Monte Carlo.

Ranking method of queues applied to the foundry sector

Abstract: The present article is to suggest a form of ranking for queues inter-process in the foundry sector, in particular from process of molding to foundry. In order to obtain a way to increase the productivity of the sector, which has recurrent problems of bulky queues and lack of agility in customer service. This article proposes an ordering of batches by the foundry industry, considering the profit and the processing time. For this, we used methodologies such as Queue Theory, Markov Chain and Monte Carlo Simulation, what enable propose as improvement the reorganization of care and through the analysis of indicators such as profit per hour, it was found that by prioritizing the care with less processing times, increasing the profit per hour and increasing the number of calls per shifts.

Key-words: Foundry, Ranking, Queue Theory, Markov Chain, Monte Carlo Simulation.

1. Introdução

O setor de fundição teve papel fundamental no crescimento da industrialização brasileira, chegando a representar 2,5 % de todos os produtos importados pelo país em 2011, de acordo com o Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES).

Tendo em vista a importância do setor para o país, desenvolveu-se um estudo buscando aumentar sua eficiência, através da diminuição das filas geradas durante os processos de produção no setor de fundição sem perda da qualidade dos produtos. Sendo o estudo focado em uma fundição na região dos Campos Gerais no Paraná e a partir da observação do seu sistema produtivo, desenvolveram o presente trabalho por meio da aplicação da Teoria das Filas, Simulação de Monte Carlo e Cadeia de Markov.

O primeiro passo dos autores foi realizar uma leitura aprofundada junto à comunidade acadêmica de bibliografias que relatam os problemas recorrentes das empresas de fundição. De acordo com Macedo (2014), problemas como a presença de estoques de inflados, problemas de quebras desses machos e ausência de uma rota de abastecimento dos fornos.

Segundo Drake et al. (1994), este setor possui problemas com velocidade de atendimento dos clientes; para Henshell (1996), a má programação da produção, que visa sempre maximizar a quantidade produzida, gera o grande volume de estoque.

Para solucionar tais problemas os autores utilizaram-se da Teoria das Filas, que estuda como quantificar ocorrências que geram aguarido em filas por meio de medições representativas, por exemplo: a dimensão média de uma fila, a duração média de permanência em uma fila e a média de aproveitamento dos espaços físicos (TAHA,2008).

Juntamente com a metodologia acima, também se aplicou a lógica da Cadeia de Markov, já que o processo analisado varia de forma aleatória e onde o acontecimento de algo no futuro depende somente de acontecimentos no presente (MARQUES, SILVA, 2013).

Complementar a Cadeia de Markov, desenvolveu-se uma análise baseada na Simulação Estocástica ou de Monte Carlo. Uma simulação se baseia em apresentar o andamento de um sistema com a contribuição de uma amostra, o que nos proporciona analisar possíveis hipóteses de dados monitorados, o método tem como objetivo congrega informações de modo arbitrário (SILVA et al., 1998).

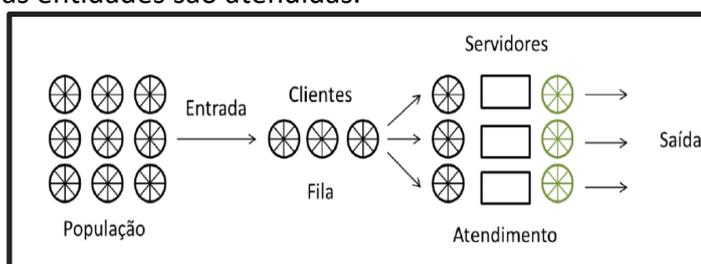
A partir do entendimento geral do problema relatado, foi-se proposta a reordenação dos lotes de moldes advindos da macharia, baseando-se em critérios de ranqueamento de filas, relacionados ao tempo de fundição e a rentabilidade de tais lotes, desejando alcançar maior eficiência da produção e no aumento dos lucros.

2. Referencial teórico

Neste tópico discutir-se-irá as teorias necessárias para que as filas em um processo produtivo sejam estruturada de forma otimizada e eficiente, a fim de facilitar os deslocamentos internos tanto dos funcionários quanto dos produtos, gerando assim praticidade e rapidez. Será abordado três temas relacionados à Métodos Estocásticos, sendo estes: Teoria das Filas, Cadeia de Markov, e Simulação de Monte Carlo. Ao abordar Teoria de Filas, utiliza-se critérios de classificação, sendo esses: tempo de processo, demanda, lucro. Esta classificação serve ordenar os paletes que são produzidos na macharia e que ficam na espera para o processo de fundição.

2.1 Teoria das Filas

De acordo com Andrade (2015), a Teoria das Filas trata de problemas de congestionamento de sistemas, cuja característica principal é a presença de “clientes” solicitando “serviços” de alguma maneira. Em sua expressão mais simples, um sistema de filas é composto de elementos que querem ser atendidos em um posto de serviço, chamados de população, e que eventualmente, devem esperar em uma fila até que o posto de atendimento esteja disponível como demonstrado na figura abaixo na Figura 1. O desempenho de uma fila pode ser afetado dependendo de como as entidades são atendidas.



Fonte: Sampaio et Oliveira (2013)

Figura 1– Exemplo de sistema de filas

Esta teoria utiliza de modelos matemáticos que auxiliam a caracterizar uma determinada fila e seu comportamento, expondo conceitos, ou medidas de desempenho, fundamentais da fila. Segundo Santos (2003), destacam-se as seguintes definições: taxa de entrada ou taxa de

chegada, que é a taxa média de chegadas de clientes, por unidade de tempo, ao sistema (λ); taxa de atendimento ou taxa de serviço, que é a taxa média de atendimento de um canal por unidade de tempo (μ); probabilidade de zero unidades no sistema, ou seja, a probabilidade do sistema estar vazio ou a probabilidade de existirem inúmeros clientes no sistema; o número médio (esperado) de unidades no sistema; o número máximo (Lq_{max}), ou seja, o momento em que a fila possui o maior tamanho; o número médio (esperado) de unidades na fila (Lq), representado pela equação (1):

$$Lq = \frac{Lq_x + Lq_y + Lq_z}{3} \quad (1);$$

A taxa de chegada efetiva (λ_{ef}) que dá a taxa média das unidades que realmente permanecem no sistema, ou seja, é a taxa média de entrada de unidades no sistema; o maior tempo que uma unidade permanece no sistema e na fila (Wq_{max}); o tempo médio (esperado) que cada unidade permanece no sistema e na fila (Wq), representado pela equação (2):

$$Wq = \frac{Wq_x + Wq_y + Wq_z}{3} \quad (2);$$

A partir da aplicação da Teoria das Filas, é possível analisar a probabilidade da ocorrência de certos fenômenos no futuro, baseando-se em acontecimentos precedentes que geram um sistema de equações, as quais exibem um comportamento probabilístico para eventos futuros, isso se denomina Cadeia de Markov.

2.3 Cadeias de Markov

Segundo Staudt, Coelho e Gonçalves (2011), em relação a cadeias de Markov, muitos trabalhos fazem o uso das matrizes de transição resultantes do fluxo produtivo de uma empresa, para analisar por exemplo: custos de produção, preços de venda e capacidade produtiva.

Tendo em vista que um processo estocástico é uma ocorrência que varia em algum grau, de maneira imprevisível, conforme o tempo passa; formando um conjunto de variáveis aleatórias em um espaço amostral relacionado a uma variável de tempo $X(t)$. Sendo válido ressaltar que os valores que $X(t)$ pode assumir são chamados de estados e o seu conjunto X , de espaço de estados (CLARKE; DISNEY, 1979).

Quando o acontecimento de um evento no estado futuro depender somente do estado imediatamente precedente, este é um processo estocástico markoviano. Por conseguinte, quando um processo markoviano tem variáveis aleatórias $Z(t)$ definidas em um espaço de estados discretos, temos uma cadeia de Markov (MARQUES; SILVA, 2013).

Devido às vantagens de sintetizar as probabilidades de transição em uma etapa utilizando a notação matricial $N \times N$, onde N é o número de estados, as propriedades desses modelos são estudadas em termos das propriedades das matrizes de transições de estados (MARQUES; SILVA, 2013). Podendo ser representada como a matriz abaixo (Figura 2):

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

Fonte: Marques e Silva (2013)

Figura 2 – Matriz com N números de estados

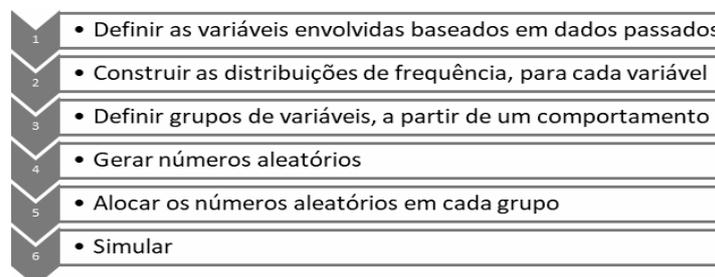
Sendo o símbolo p_{ij} , a probabilidade de transição do estado i para o estado j em uma fase; representando um sistema que está no estado i em um certo momento, e venha a estar no estado j no intervalo de tempo seguinte. Podendo-se denotar a probabilidade de transição do estado i para o estado j em n períodos de tempo por $p_{ij}^{(n)}$ ou simplesmente $P^{(n)}$ (GRIGOLETTI, 2011).

A probabilidade de que uma cadeia de Markov esteja no período n e estado j , é $\pi_j^{(n)}$, para $n \geq 0$. Sendo importante ressaltar que $\pi_j^{(0)}$ indica a probabilidade de que a cadeia de Markov esteja inicialmente no estado j . Para cadeias de Markov que possuem mais de um estado N , convém considerar o vetor linha: $\pi^{(n)} = [\pi_1^{(n)}, \pi_2^{(n)}, \dots, \pi_N^{(n)}]$, chamado de distribuição da cadeia de Markov no tempo n . A distribuição da cadeia de Markov em qualquer tempo n é dada por: $\pi^{(n)} = \pi^{(0)} \cdot P^{(n)}$, ao ser considerada uma cadeia de Markov com distribuição inicial $\pi^{(0)}$ e a matriz de transição P (GRIGOLETTI, 2011).

Com fundamento nas probabilidades geradas pelo método de Markov e com auxílio da Teoria das Filas, pode-se simular acontecimentos probabilísticos futuros, onde observar-se o comportamento de inúmeros números gerados de modo arbitrário e constata-se o intervalo de maior repetição, isso então se denomina como Simulação de Monte Carlo.

2.3 Simulação de Monte Carlo

A Simulação de Monte Carlo trata-se de um evento probabilístico que possui números gerados de maneira aleatória, para auxiliar na tomada de decisão e resolução de um problema, com referência em suas variáveis precedentes (LUSTOSA et al., 2004). Os passos necessários para essa simulação se encontram na Figura 3.



Fonte: Adaptado de Shamblin e Stevens (1974)

Figura 3 – Passos para operacionalização do método de simulação de Monte Carlo

Uma forma de avaliar a Simulação de Monte Carlo, é simular mais de cem vezes os números aleatórios para que alcance um espaço amostral significativo (LUSTOSA et al., 2004.)

2.4 Filas em fundições

Encontra-se diversas literaturas relacionadas a utilização de Pesquisa Operacional na resolução de problemas de tamanho de lote, previsão de demanda e planejamento da produção de fundições.

Tonaki (2006), realizou uma modelagem matemática para a programação do dimensionamento dos lotes, em seu trabalho foi relatado que o maior gargalo do sistema de fundição estudado são os fornos e que envolto no *lead time*¹ da empresa está o tempo de transporte dos lotes e também o tempo de espera dos mesmo entre os processos.

Em Landmann (2005), no entanto, há a citação da utilização de Simulações para a previsão de demandas em fundições de forma a auxiliar na programação da produção, o que reduziu o tempo e a fila de produtos a serem entregues aos clientes finais.

Stawowy e Duda, apesar de não utilizarem a ferramenta em seu trabalho, sobre a programação e o agendamento de produção, citam que uma das ferramentas que podem ser utilizadas para a solução de tal problema é a Teoria das Filas.

Com base nos conhecimentos mencionados, ocorrerá a aplicação dos mesmos para a resolução da problemática abordada na descrição do problema a seguir.

3. Descrição do problema

O foco deste artigo parte de uma problemática encontrada em uma empresa de fundição, que consiste no surgimento de uma fila de produtos agrupados em paletes que provém da macharia e que irão para a fundição, ocasionando em problemas de cumprimento de prazos com os clientes, aumento de estoques, desperdícios e diminuição do potencial de produção. Na figura 4, pode-se observar o layout da área de macharia e fundição, mostrando também como ocorre o acúmulo desordenado de paletes na espera para a fundição.

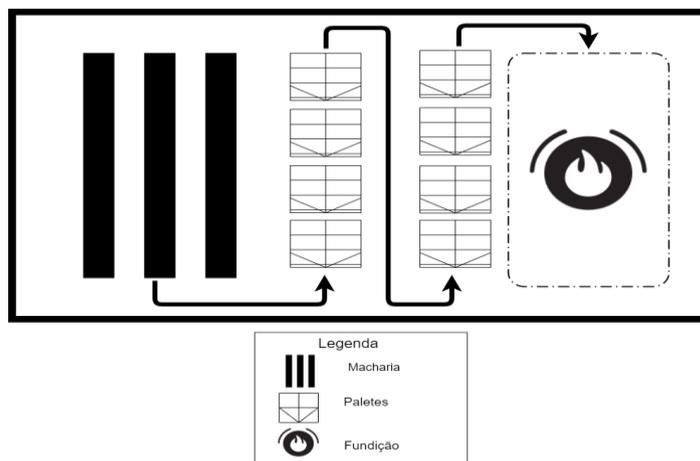


Figura 4 – Layout da área de macharia e fundição

A fila surge, possivelmente, pela diferença de tempos de processamento da peça na macharia em relação a fundição e pela falta de organização na escolha do mix de produção para maximizar o lucro e otimização do processo. Sendo válido ressaltar, como o acúmulo desses produtos intermediários acaba aumentando os estoques e respectivamente seu custo, assim como a disposição aleatória que dificulta a logística interna.

A análise desta fila nos possibilitou constatar um modelo conhecido como FIFO (First In First Out), no qual o primeiro lote que saiu da macharia e foi alocado aleatoriamente, será o primeiro a ser atendido pela fundição, ou seja, o primeiro palete a entrar na fila, será o primeiro a ser processado na próxima etapa.

4. Dados

A coleta de dados tem suma importância para a análise e resolução do problema, e é de extrema relevância que os dados sejam os mais fidedignos possível. Esta pesquisa foi realizada

por meio de estimativas dos valores reais de produção da fundição em questão, como coleta de dados, em um período de 9 horas de um dia da produção e se encontram no ANEXO A.

Juntamente no ANEXO A, o restante dos dados que são simulados, são representados a partir de 20 horas e os mesmos foram obtidos a partir de sorteio para a aplicação da Cadeia de Markov e Simulação de Monte Carlo, gerando assim dados de 5 dias de funcionamento de uma empresa de fundição que possui a parte da macharia e fundição, com 2 turnos de 8 horas por dia.

Sendo obtida a seguinte ordem de atendimento, a partir do sorteio, para organização da fila: C;A;B;A;B;B;A;C;B;C;B;A;B;B;A;A;C;C;A;A;B;C;C;B;B;C;A;B;A;B;A;C;C;A;B;A;C;A;B;A;C;A;B;A;A;A;C.

A sequência da chegada também definida a partir de sorteio, foi: A;C;A;B;A;A;A;C.

Foram simulados 3 tipos de produtos (A, B e C) fabricados durante o período, descrito anteriormente, seus estoques, que se encontram na Tabela 2, assim como o lucro, tempo de processamento da fundição (Tabela 1) e setup (Tabela 2). Através do método de Monte Carlo e Cadeia de Markov, foram obtidos os dados de tempos de chegada e o produto de cada palete que forma a fila. Assumiu-se que a produção iniciou com um estoque anterior de 40 lotes, o qual possuía 9 peças de A, 19 peças de B e 12 peças de C.

| Produto | Lucro | Duração na Fundição (h) |
|---------|------------|-------------------------|
| A | R\$ 100.00 | 1.5 |
| B | R\$ 120.00 | 1.2 |
| C | R\$ 150.00 | 1.7 |

Fonte: Autoria própria.

Tabela 1 - Tempo de processamento e lucro dos produtos A, B e C

| Produto | Lucro | Duração na Fundição (h) |
|---------|------------|-------------------------|
| A | R\$ 100.00 | 1.5 |
| B | R\$ 120.00 | 1.2 |
| C | R\$ 150.00 | 1.7 |

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 - Matriz de tempo de setup dos produtos A, B e C

5. Cálculo e discussão dos resultados

5.1 Dados

Baseando-se nos dados apresentados anteriormente analisou-se a entrada de um lote na fundição, o que é indicado pelo número 1 na coluna de atendimento do Anexo B. A coluna de atendimento juntamente com a fila inicial de 40 paletes, permitiu o cálculo do atendimento acumulado, que é a soma dos atendimentos ocorridos até o instante analisado. Para adquirir a chegada acumulada, a fila foi somada ao atendimento acumulado. Foi criada a coluna de número de servidores, para representar o número de servidores disponíveis para atendimento. Tais informações, encontram-se no ANEXO B.

Perante as informações do ANEXO B, encontrou-se para Lq_{max} um valor de 40 lotes na fila, nos instantes 0 e 2 horas. Para o cálculo de Lq analisou-se intervalos aproximadamente iguais, de 6 horas, procurando evitar uma disparidade nos dados, e o valor encontrado foi de

37,33 lotes. É importante ressaltar que o cálculo dos Lq 's foi realizado desde o instante 0 até quando se encerra a chegada de lotes (20 horas).

Pode-se verificar os tempos de espera máximo (Wq_{max}) e médio (Wq), a partir dos dados do ANEXO B. É válido ressaltar que o tempo de fila foi calculado a partir da demora entre a chegada do lote na fila e o atendimento, já para a determinação de espera média analisou-se o tempo de espera dos lotes que chegaram com intervalo de aproximadamente 6 hora, assim como o Lq . Os tempos de espera encontrados, foram $Wq_{max} = 69,03$ horas e $Wq = 65,89$ horas.

A fim de obter um maior entendimento por meio de um indicador, é possível avaliar a lucratividade obtida com base na produção da semana observada, sendo ela 5900,00 reais, outra análise possível poderia ser em relação ao tempo, onde obtêm-se 70,38 reais por hora.

5.2 Propostas de melhoria

Como proposta para diminuir o tempo de espera na fila dos produtos, e assim aumentar a lucratividade da empresa, adotou-se o critério de ranqueamento, onde por meio da atribuição de pesos a determinadas categorias de importância pré definidas, realiza-se um cálculo para identificar possíveis formas de ordenação da fila, a fim de diminuir os tempos de espera na fila e aumentar a produtividade.

Para a realização dos cálculos foram desenvolvidas duas categorias de ranqueamento: o lucro por lote (A, B ou C) e a duração de processamento de cada um dos mesmos durante o processo de fundição.

A partir de tais categorias redigiu-se a seguinte fórmula, para priorizar os produtos a serem processados:

$$\text{Ranking de } X = (W1 \times \text{Índice } X1) + (W2 \times \text{Índice } X2)$$

onde X é o lote que está sendo avaliado, W1 e W2 representam a importância atribuída pela empresa para as duas categorias analisadas e ambos são quantificados de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo o peso for de 1, mais relevante será a categoria. O Índice X1 e Índice X2 representam utilidade para a empresa e também variam de 0 a 1, sendo o primeiro índice relacionado ao tempo de processamento e o segundo relacionado ao lucro de cada lote de produto.

Os valores dos índices A1 e B2, foram encontrados por uma interpolação linear. Para encontrar o índice A1 baseou-se nos índices B1 = 1 e C1 = 0 para realizar a interpolação e para encontrar o Índice B2, a interpolação foi feita baseada nos índices A2 = 0 e C2 = 1. A escolha desses valores foi realizada pois escolheu-se interpolar a partir dos valores extremos. A partir deste cálculo obtêm-se então como Índice A1 e Índice B2, respectivamente, 0,6 e 0,4. Obtendo-se portanto as seguintes fórmulas para cada tipo de lote:

$$\text{Ranking de } A = (W1 \times 0,6) + (W2 \times 0)$$

$$\text{Ranking de } B = (W1 \times 1) + (W2 \times 0,4)$$

$$\text{Ranking de } C = (W1 \times 0) + (W2 \times 1)$$

As expressões acima mostram que para cada rank é necessário definir os pesos W1 e W2. Assim o número de simulações é fundamentado nesses dois parâmetros. Para análise serão consideradas quatro combinações de pesos, totalizando em quatro simulações. Na primeira simulação, utilizou-se W1 = 1 e W2 = 0 a fim de tentar priorizar o lucro, o que gerou um ranking

de atendimento dos produtos na seguinte ordem: B, A, C. Na segunda simulação os valores de W_1 e W_2 se invertem com a finalidade de privilegiar o tempo mínimo de processamento, resultando na sequência de C, B, A. A terceira e a quarta simulação resultaram em ranqueamentos iguais com sequência de B, C, A; com W_1 e W_2 assumindo respectivamente os valores de 0,4 e 0,6 para a terceira simulação e vice-versa para a quarta. Sendo importante salientar que quanto maior o ranking resultante maior a prioridade para esse tipo de lote.

Após o ranqueamento, foi realizada a disposição das filas (ANEXO C) e o cálculo dos novos $\overline{Wq}(Wq_{med})$, Wq_{max} , Lq_{med} e Lq_{max} explicitados na Tabela 3. Com esses dados, obteve-se que a primeira simulação o Lucro por hora é de R\$84,65, para a segunda é de R\$82,56 e para a terceira e quarta é de R\$ 83,93.

| | 1ª Simulação | 2ª Simulação | 3ª Simulação |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| \overline{Wq} | 53.15 | 53.72 | 52.02 |
| Lq | 35.33 | 37.00 | 35.33 |
| Wq_{MAX} | 62.40 | 63.47 | 62.30 |
| Lq_{MAX} | 40.00 | 40.00 | 40.00 |

Fonte: Aatoria própria.

Tabela 3 - Resultados das simulações 1, 2 e 3

É válido ressaltar que utilizamos de um método onde ocorre a priorização dos lotes que já estavam na fila no início da análise de dados. Sendo que os lotes que estão chegando na fila, também são priorizados da mesma maneira, mas estes só serão atendidos ao fim do última sequência.

6. Conclusão

Por meio da comparação dos valores encontrados de lucro por hora na coleta de dados e após a realização do ranqueamento. Conclui-se que mesmo o pior cenário de ranqueamento, ou seja, aquele que apresentou menor lucro por hora, possui um lucro por hora maior que o atual, certificando as vantagens da metodologia. De forma, que grande parte do tempo ganho é advindo da redução no número de setups realizados.

Ainda é importante observar que o cenário que prioriza o lucro não trouxe o maior lucro por hora, sendo mais lucrativo priorizar o tempo de processamento de cada lote de produto, devido ao maior tempo disponível pode-se obter uma maior produtividade e consequentemente um maior lucro.

Entende-se então que a Metodologia auxilia à atingir os objetivos estratégico da empresa, geralmente tais objetivos são representados pelas categorias utilizadas para realizar a priorização, e facilita a tomada de decisão diminuindo o tempo demandado para tal processo.

7. Referências

ANDRADE, E. L. Problemas de Congestionamento das Filas. In: ANDRADE, E. L. **Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e modelos para análise de decisões**. Ed. 4. Rio de Janeiro : LTC, 2009. Cap. 6, p. 104-120.

CLARKE, A. B.; DISNEY, R. L. **Probabilidade e processos estocásticos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.

DRAKE, Kenneth et al. **Application specific electronic modules (ASEM) CAD/CAE/CAM interface specification alliance**. In: Proceedings of IEEE Multi-Chip Module Conference (MCMC-94). IEEE, 1994. p. 44-49.

- GRIGOLETTI, Pablo Souza. **Cadeias de Markov**. Recuperado em, v. 19, n. 10, p. 2014, 2011.
- HENSHELL, R. D. **IT in foundries – engineering data management and layout optimisation**. *Foundryman*, v. 89, n. 2, p. 47-50, feb. 1996.
- LANDMANN, Raul et al. **Um modelo heurístico para a programação da produção em fundições com utilização da Lógica Fuzzy**. 2005.
- LUSTOSA, P. R. B.; PONTE, V. M. R.; DOMINAS, W. R. Simulação. In: CORRAR, L. J.; THEÒPHILO, C. R. (Orgs.). **Pesquisa Operacional para decisão em contabilidade e administração**. São Paulo: Atlas, 2004.
- MARQUES, Jair Mendes; SILVA, Sani de Carvalho Rutz. **A cadeia de Markov na determinação de indicadores educacionais**. *Revista da FAE*, v. 16, n. 2, p. 88-101, 2013.
- SANTOS, MAURÍCIO. Apostila de Pesquisa Operacional da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), R. J., Brasil, 2003.
- SILVA, Tallyta Carolyne Martins; JÚNIOR, Valdivino Vargas. **Cadeias de Markov: Conceitos e Aplicações em Modelos de Difusão de Informação**. 2011.
- STAUDT, Francielly Hedler; COELHO, Antonio Sérgio; GONÇALVES, Mirian Buss. **Determinação da capacidade real necessária de um processo produtivo utilizando cadeia de Markov**. *Production*, v. 21, n. 4, p. 634-644, 2011.
- STAWOWY, A.; DUDA, J. **Models and algorithms for production planning and scheduling in foundries-current state and development perspectives**. *Archives of Foundry Engineering*, v. 12, n. 2, p. 69-74, 2012.
- TAHA, Hamdy A. **Pesquisa operacional**. Pearson Educación, 2008.
- TONAKI, Viviane Sayuri. **Uma heurística para o problema de dimensionamento de lotes em fundições de mercado**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

8.ANEXO
Anexo A-Dados

| Hora de atendimento/chegada | Chegada na Fila | Produto que chegou na fila | Produto atendido | Atendimento |
|------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|
| 0 | 0 | - | - | 0 |
| 1.7 | 0 | - | C | 1 |
| 2 | 1 | A | - | 0 |
| 3.53 | 0 | - | A | 1 |
| 5.07 | 0 | - | B | 1 |
| 5,6 | 1 | C | - | 0 |
| 6.98 | 0 | - | A | 1 |
| 8.52 | 0 | - | B | 1 |
| 8,8 | 1 | A | - | 0 |
| 9.72 | 0 | - | B | 1 |
| 10,2 | 1 | B | - | 0 |
| 11.63 | 0 | - | A | 1 |
| 13.83 | 0 | - | C | 1 |
| 14,09 | 1 | A | - | 0 |
| 15.70 | 0 | - | B | 1 |
| 16,44 | 1 | A | - | 0 |
| 17.65 | 0 | - | C | 1 |
| 18,03 | 1 | A | - | 0 |
| 19.52 | 0 | - | B | 1 |
| 19,59 | 1 | C | - | 0 |
| 21.43 | 0 | - | A | 1 |
| 22.97 | 0 | - | B | 1 |
| 24.17 | 0 | - | B | 1 |
| 26.08 | 0 | - | A | 1 |
| 27.58 | 0 | - | A | 1 |
| 29.78 | 0 | - | C | 1 |
| 31.48 | 0 | - | C | 1 |
| 33.32 | 0 | - | A | 1 |
| 34.82 | 0 | - | A | 1 |
| 36.35 | 0 | - | B | 1 |
| 38.30 | 0 | - | C | 1 |
| 40.00 | 0 | - | C | 1 |
| 41.87 | 0 | - | B | 1 |
| 43.07 | 0 | - | B | 1 |
| 44.27 | 0 | - | B | 1 |
| 46.22 | 0 | - | C | 1 |
| 48.05 | 0 | - | A | 1 |
| 49.58 | 0 | - | B | 1 |
| 51.50 | 0 | - | A | 1 |
| 53.03 | 0 | - | B | 1 |
| 54.95 | 0 | - | A | 1 |
| 57.15 | 0 | - | C | 1 |
| 58.85 | 0 | - | C | 1 |
| 60.68 | 0 | - | A | 1 |
| 62.22 | 0 | - | B | 1 |
| 64.13 | 0 | - | A | 1 |
| 65.67 | 0 | - | C | 1 |
| 67.50 | 0 | - | A | 1 |
| 69.03 | 0 | - | B | 1 |
| 70.95 | 0 | - | A | 1 |
| 73.15 | 0 | - | C | 1 |
| 75.18 | 0 | - | A | 1 |
| 76.72 | 0 | - | B | 1 |
| 78.63 | 0 | - | A | 1 |
| 80.13 | 0 | - | A | 1 |
| 81.63 | 0 | - | A | 1 |
| 83.83 | 0 | - | C | 1 |

Anexo B- Cálculos

| Hora de atendimento/ chegada | Chegada na Fila | Chegada acumulada | Fila (lotes) | Produto que chegou na fila | Produto atendido | Atendimento | Atendimento acumulado | Número servidores | Tempo de espera do produto atendido |
|------------------------------|-----------------|-------------------|--------------|----------------------------|------------------|-------------|-----------------------|-------------------|-------------------------------------|
| 0 | 0 | 40 | 40 | - | - | 0 | 0 | 1 | |
| 1.7 | 0 | 40 | 39 | - | C | 1 | 1 | 0 | 1.70 |
| 2 | 1 | 41 | 40 | A | - | 0 | 1 | 0 | |
| 3.53 | 0 | 41 | 39 | - | A | 1 | 2 | 0 | 3.53 |
| 5.07 | 0 | 41 | 38 | - | B | 1 | 3 | 0 | 5.07 |
| 5,6 | 1 | 42 | 39 | C | - | 0 | 3 | 0 | |
| 6.98 | 0 | 42 | 38 | - | A | 1 | 4 | 0 | 6.98 |
| 8.52 | 0 | 42 | 37 | - | B | 1 | 5 | 0 | 8.52 |
| 8,8 | 1 | 43 | 38 | A | - | 0 | 5 | 0 | |
| 9.72 | 0 | 43 | 37 | - | B | 1 | 6 | 0 | 9.72 |
| 10,2 | 1 | 44 | 38 | B | - | 0 | 6 | 0 | |
| 11.63 | 0 | 44 | 37 | - | A | 1 | 7 | 0 | 11.63 |
| 13.83 | 0 | 44 | 36 | - | C | 1 | 8 | 0 | 13.83 |
| 14,09 | 1 | 45 | 37 | A | - | 0 | 8 | 0 | |
| 15.70 | 0 | 45 | 36 | - | B | 1 | 9 | 0 | 15.70 |
| 16,44 | 1 | 46 | 37 | A | - | 0 | 9 | 0 | |
| 17.65 | 0 | 46 | 36 | - | C | 1 | 10 | 0 | 17.65 |
| 18,03 | 1 | 47 | 37 | A | - | 0 | 10 | 0 | |
| 19.52 | 0 | 47 | 36 | - | B | 1 | 11 | 0 | 19.52 |
| 19,59 | 1 | 48 | 37 | C | - | 0 | 11 | 0 | |
| 21.43 | 0 | 48 | 36 | - | A | 1 | 12 | 0 | 21.43 |
| 22.97 | 0 | 48 | 35 | - | B | 1 | 13 | 0 | 22.97 |
| 24.17 | 0 | 48 | 34 | - | B | 1 | 14 | 0 | 24.17 |
| 26.08 | 0 | 48 | 33 | - | A | 1 | 15 | 0 | 26.08 |
| 27.58 | 0 | 48 | 32 | - | A | 1 | 16 | 0 | 27.58 |
| 29.78 | 0 | 48 | 31 | - | C | 1 | 17 | 0 | 29.78 |
| 31.48 | 0 | 48 | 30 | - | C | 1 | 18 | 0 | 31.48 |
| 33.32 | 0 | 48 | 29 | - | A | 1 | 19 | 0 | 33.32 |
| 34.82 | 0 | 48 | 28 | - | A | 1 | 20 | 0 | 34.82 |
| 36.35 | 0 | 48 | 27 | - | B | 1 | 21 | 0 | 36.35 |
| 38.30 | 0 | 48 | 26 | - | C | 1 | 22 | 0 | 38.30 |
| 40.00 | 0 | 48 | 25 | - | C | 1 | 23 | 0 | 40.00 |
| 41.87 | 0 | 48 | 24 | - | B | 1 | 24 | 0 | 41.87 |
| 43.07 | 0 | 48 | 23 | - | B | 1 | 25 | 0 | 43.07 |
| 44.27 | 0 | 48 | 22 | - | B | 1 | 26 | 0 | 44.27 |
| 46.22 | 0 | 48 | 21 | - | C | 1 | 27 | 0 | 46.22 |
| 48.05 | 0 | 48 | 20 | - | A | 1 | 28 | 0 | 48.05 |
| 49.58 | 0 | 48 | 19 | - | B | 1 | 29 | 0 | 49.58 |
| 51.50 | 0 | 48 | 18 | - | A | 1 | 30 | 0 | 51.50 |
| 53.03 | 0 | 48 | 17 | - | B | 1 | 31 | 0 | 53.03 |
| 54.95 | 0 | 48 | 16 | - | A | 1 | 32 | 0 | 54.95 |
| 57.15 | 0 | 48 | 15 | - | C | 1 | 33 | 0 | 57.15 |
| 58.85 | 0 | 48 | 14 | - | C | 1 | 34 | 0 | 58.85 |
| 60.68 | 0 | 48 | 13 | - | A | 1 | 35 | 0 | 60.68 |
| 62.22 | 0 | 48 | 12 | - | B | 1 | 36 | 0 | 62.22 |
| 64.13 | 0 | 48 | 11 | - | A | 1 | 37 | 0 | 64.13 |
| 65.67 | 0 | 48 | 10 | - | C | 1 | 38 | 0 | 65.67 |
| 67.50 | 0 | 48 | 9 | - | A | 1 | 39 | 0 | 67.50 |
| 69.03 | 0 | 48 | 8 | - | B | 1 | 40 | 0 | 69.03 |
| 70.95 | 0 | 48 | 7 | - | A | 1 | 41 | 0 | 68.95 |
| 73.15 | 0 | 48 | 6 | - | C | 1 | 42 | 0 | 67.55 |
| 75.18 | 0 | 48 | 5 | - | A | 1 | 43 | 0 | 66.38 |
| 76.72 | 0 | 48 | 4 | - | B | 1 | 44 | 0 | 66.52 |
| 78.63 | 0 | 48 | 3 | - | A | 1 | 45 | 0 | 64,54 |
| 80.13 | 0 | 48 | 2 | - | A | 1 | 46 | 0 | 63,69 |
| 81.63 | 0 | 48 | 1 | - | A | 1 | 47 | 0 | 63,6 |
| 83.83 | 0 | 48 | 0 | - | C | 1 | 48 | 0 | 64,24 |

Anexo C -Propostas de melhoria

| Hora de atendimento/ chegada | Chegada na Fila | Fila (lotes) | Atendimento acumulado | 1ª Simulação | | 2ª Simulação | | 3ª e 4ª Simulação | |
|---------------------------------|-----------------|--------------|-----------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | | | Produto atendido | Tempo de espera | Produto atendido | Tempo de espera | Produto atendido | Tempo de espera |
| 0.00 | - | 40.00 | 0.00 | - | - | - | - | - | - |
| 1.20 | - | 39.00 | 1.00 | B | 1.20 | C | 1.70 | B | 1.20 |
| 2.00 | A | | | | | | | | |
| 2.40 | - | 39.00 | 2.00 | B | 2.40 | C | 3.40 | B | 2.40 |
| 3.60 | - | 38.00 | 3.00 | B | 3.60 | C | 5.10 | B | 3.60 |
| 5.60 | C | | | | | | | | |
| 4.80 | - | 38.00 | 4.00 | B | 4.80 | C | 6.80 | B | 4.80 |
| 6.00 | - | 37.00 | 5.00 | B | 6.00 | C | 8.50 | B | 6.00 |
| 8.80 | A | | | | | | | | |
| 7.20 | - | 37.00 | 6.00 | B | 7.20 | C | 10.20 | B | 7.20 |
| 10.20 | B | | | | | | | | |
| 8.40 | - | 37.00 | 7.00 | B | 8.40 | C | 11.90 | B | 8.40 |
| 9.60 | - | 36.00 | 8.00 | B | 9.60 | C | 13.60 | B | 9.60 |
| 14.90 | A | | | | | | | | |
| 10.80 | - | 36.00 | 9.00 | B | 10.80 | C | 15.30 | B | 10.80 |
| 16.44 | A | | | | | | | | |
| 12.00 | - | 36.00 | 10.00 | B | 12.00 | C | 17.00 | B | 12.00 |
| 18.03 | A | | | | | | | | |
| 13.20 | - | 36.00 | 11.00 | B | 13.20 | C | 18.70 | B | 13.20 |
| 19.59 | C | | | | | | | | |
| 14.40 | - | 36.00 | 12.00 | B | 14.40 | C | 20.40 | B | 14.40 |
| 15.60 | - | 35.00 | 13.00 | B | 15.60 | B | 22.27 | B | 15.60 |
| 16.80 | - | 34.00 | 14.00 | B | 16.80 | B | 23.47 | B | 16.80 |
| 18.00 | - | 33.00 | 15.00 | B | 18.00 | B | 24.67 | B | 18.00 |
| 19.20 | - | 32.00 | 16.00 | B | 19.20 | B | 25.87 | B | 19.20 |
| 20.40 | - | 31.00 | 17.00 | B | 20.40 | B | 27.07 | B | 20.40 |
| 21.60 | - | 30.00 | 18.00 | B | 21.60 | B | 28.27 | B | 21.60 |
| 22.80 | - | 29.00 | 19.00 | B | 22.80 | B | 29.47 | B | 22.80 |
| 24.72 | - | 28.00 | 20.00 | A | 24.72 | B | 30.67 | C | 24.75 |
| 26.22 | - | 27.00 | 21.00 | A | 26.22 | B | 31.87 | C | 26.45 |
| 27.72 | - | 26.00 | 22.00 | A | 27.72 | B | 33.07 | C | 28.15 |
| 29.22 | - | 25.00 | 23.00 | A | 29.22 | B | 34.27 | C | 29.85 |
| 30.72 | - | 24.00 | 24.00 | A | 30.72 | B | 35.47 | C | 31.55 |
| 32.22 | - | 23.00 | 25.00 | A | 32.22 | B | 36.67 | C | 33.25 |
| 33.72 | - | 22.00 | 26.00 | A | 33.72 | B | 37.87 | C | 34.95 |
| 35.22 | - | 21.00 | 27.00 | A | 35.22 | B | 39.07 | C | 36.65 |
| 36.72 | - | 20.00 | 28.00 | A | 36.72 | B | 40.27 | C | 38.35 |
| 38.92 | - | 19.00 | 29.00 | C | 38.92 | B | 41.47 | C | 40.05 |
| 40.62 | - | 18.00 | 30.00 | C | 40.62 | B | 42.67 | C | 41.75 |
| 42.32 | - | 17.00 | 31.00 | C | 42.32 | B | 43.87 | C | 43.45 |
| 44.02 | - | 16.00 | 32.00 | C | 44.02 | A | 45.78 | A | 45.28 |
| 45.72 | - | 15.00 | 33.00 | C | 45.72 | A | 47.28 | A | 46.78 |
| 47.42 | - | 14.00 | 34.00 | C | 47.42 | A | 48.78 | A | 48.28 |
| 49.12 | - | 13.00 | 35.00 | C | 49.12 | A | 50.28 | A | 49.78 |
| 50.82 | - | 12.00 | 36.00 | C | 50.82 | A | 51.78 | A | 51.28 |
| 52.52 | - | 11.00 | 37.00 | C | 52.52 | A | 53.28 | A | 52.78 |
| 54.22 | - | 10.00 | 38.00 | C | 54.22 | A | 54.78 | A | 54.28 |
| 55.92 | - | 9.00 | 39.00 | C | 55.92 | A | 56.28 | A | 55.78 |
| 57.62 | - | 8.00 | 40.00 | C | 57.62 | A | 57.78 | A | 57.28 |
| 59.48 | - | 7.00 | 41.00 | B | 49.28 | C | 54.38 | B | 48.62 |
| 61.40 | - | 6.00 | 42.00 | A | 59.40 | C | 42.09 | C | 55.17 |
| 62.90 | - | 5.00 | 43.00 | A | 54.10 | B | 53.35 | C | 42.88 |
| 64.10 | - | 4.00 | 44.00 | A | 49.20 | A | 63.47 | A | 62.30 |
| 65.80 | - | 3.00 | 45.00 | A | 49.36 | A | 58.17 | A | 57.00 |
| 65.80 | - | 2.00 | 46.00 | A | 47.77 | A | 53.57 | A | 52.40 |
| 68.00 | - | 1.00 | 47.00 | C | 62.40 | A | 53.53 | A | 52.36 |
| 69.70 | - | 0.00 | 48.00 | C | 50.11 | A | 53.44 | A | 52.27 |