

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**APLICAÇÃO DE PRINCÍPIOS DA TEORIA DAS
RESTRIÇÕES: UM ESTUDO DE SIMULAÇÃO EM UM
SISTEMA DE PRODUÇÃO ARRANJADO POR
PRODUTOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Talita Mattos Schneider

Santa Maria, RS, Brasil

2017

**APLICAÇÃO DE PRINCÍPIOS DA TEORIA DAS
RESTRIÇÕES: UM ESTUDO DE SIMULAÇÃO EM UM
SISTEMA DE PRODUÇÃO ARRANJADO POR
PRODUTOS**

POR

Talita Mattos Schneider

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia de Produção**.

Orientador: Marcelo Battesini

Santa Maria, RS, Brasil

2017

APLICAÇÃO DE PRINCÍPIOS DA TEORIA DAS RESTRIÇÕES: UM ESTUDO DE SIMULAÇÃO EM UM SISTEMA DE PRODUÇÃO ARRANJADO POR PRODUTOS

APPLICATION OF THEORY OF CONSTRAINTS PRINCIPLES: A SIMULATION STUDY IN A SINGLE PRODUCT FLOW SHOP SYSTEM

Talita Mattos Schneider¹, Marcelo Battesini²

RESUMO:

Constantemente, as empresas passam por aperfeiçoamentos na busca por vantagem competitiva. A Teoria das Restrições (TOC) surgiu exatamente como uma proposta de melhoria dos métodos de programação da produção, diferenciando-se dos métodos tradicionais. O objetivo deste trabalho é, através de simulação computacional, verificar se a aplicação de princípios da TOC apresentados no livro “A Meta” garante melhorias perceptíveis a um sistema de produção arranjado por produtos. A partir da introdução de princípios da TOC e experimentação dos fatores Posição do Gargalo e Tempo de Processamento do Gargalo, o monitoramento das variáveis Total de Itens Produzidos e Work in Process (WIP) médio em diferentes situações e cenários indicou que a TOC foi benéfica para o desempenho do sistema retratado, demonstrando que a TOC pode servir como vantagem competitiva para empresas diferenciarem-se de seus concorrentes.

Palavras-chave: TEORIA DAS RESTRIÇÕES, SIMULAÇÃO, TOC, GARGALO.

ABSTRACT:

Constantly, companies go through improvements techniques searching for competitive advantage. The Theory of Constraints (TOC) has been created exactly as an option to the traditional scheduling methods, drifting apart from them. Through simulation, this study aims to verify whether the application of TOC principles presented on the book “The Goal” can guarantee perceptible improvements to a single product flow shop. From the introduction of TOC principles and experimentation of the factors Bottleneck Position and Processing Cycle Time, the monitoring of the variables Total Produced Items and average WIP in different scenarios indicated that TOC was beneficial to the presented system performance, showing that TOC can be used as competitive advantage for companies to differentiate from their concurrents.

Keywords: THEORY OF CONSTRAINTS, SIMULATION, TOC, BOTTLENECK.

¹ Graduanda em engenharia de produção, autora – UFSM.

² Engenheiro, orientador; Doutor em engenharia de produção - UFSM.

1. INTRODUÇÃO

O universo empresarial passa por mudanças constantes na busca por aperfeiçoamento. Pacheco *et al* (2014) afirmam que, sobretudo na manufatura, são muitas as transformações em sistemas de produção, as quais se devem à ameaça de novos concorrentes ou da constante busca por qualidade, visando reduzir custos, incrementar lucro e fortalecer-se competitivamente. Em termos de competitividade industrial, o desempenho das entregas se transformou nas últimas décadas em um forte elemento diferenciador e ganhador de pedidos, o que requer cada vez mais fornecimentos com *lead times* menores possíveis (SOUZA; PIRES, 2014), além da necessidade de responder rápida e efetivamente a mudanças (NEMBHARD; PRICHANONT, 2007).

Durante duas décadas, a manufatura passou por aperfeiçoamentos, desde o *Materials Requirement Planning* (MRP I e MRP II - associados à produção em massa) e o *Just in Time* (JIT – associado à produção *lean*) (WALKER II; COX III, 2006; GONZALEZ *et al*; 2010). Na década de 1980, a fim de aperfeiçoar o fluxo e orientar operações, o físico Eliyahu M. Goldratt focou em um sistema que originou a Teoria das Restrições (*Theory of constraints - TOC*), baseando-se no tempo como forma de controle, com o propósito de evitar a formação de filas (GOLDRATT, 2009; LIBRELATO *et al*, 2013). Assim, pode-se dizer que a programação da produção a partir da TOC surgiu como uma alternativa em relação aos métodos tradicionais de programação.

A TOC pode ser considerada uma poderosa técnica de planejamento e controle da produção em fábricas com gargalos (THURER *et al*, 2017). Segundo Izmailov (2014), a TOC traz uma nova dimensão à filosofia de gestão e constitui um desafio interessante para as maneiras tradicionais de analisar a rentabilidade de uma organização. A TOC é uma teoria geral para gerenciar uma organização (GOLDRATT, 1988), sendo que o método e as práticas da TOC têm se expandido para além de seu “mercado alvo inicial” no campo de gerenciamento da produção e operações (DAVIES *et al*, 2005).

Diferentes fatores impactam o desempenho e podem gerar diferentes resultados de sistemas de produção do ponto de vista da TOC, a exemplo da capacidade produtiva, localização da instalação, ordem dos recursos ao longo do fluxo de produção, bem como quantidades de estoque em processo. Segundo Choong (2013), as medidas de desempenho são métricas e indicadores que dão vida a uma organização. Para Boyd (2008), dependendo da estratégia adotada pela organização, alguns objetivos específicos tornam-se mais importantes

que outros e representam uma vantagem competitiva em uma dada área. Diante disso, é primordial identificar o cenário que otimiza ao máximo o sistema.

Costas *et al* (2015), ao aplicarem a TOC a fim de reduzir o efeito chicote na cadeia de suprimentos, constataram que apesar da TOC ser uma teoria madura, ainda não é amplamente utilizada. Um dos motivos para isso seria que seriam necessárias algumas fases educacionais para modificar o comportamento natural das pessoas. Assim sendo, os autores sugeriram que a simulação pode desempenhar um importante papel quanto a isso. Também, Betterton e Cox III (2009), ao realizarem um estudo comparativo de modelos de simulação para o controle de fluxo segundo a TOC, igualmente sugeriram que ainda é necessário realizar pesquisas acerca da TOC, especialmente em relação ao uso da lógica tambor-pulmão-corda em sistemas de produção. Ainda, de acordo com Watson *et al* (2007), apesar da crescente evidência tanto na literatura acadêmica como na imprensa popular sobre os potenciais benefícios da implantação da TOC, sua aceitação tem se mostrado vaga e incerta.

Corrêa *et al* (2007) afirmam precisamente que a programação da produção conforme a TOC funciona de acordo com a lógica de um simulador. Logo, “perguntas do tipo “o que aconteceria se...” podem ser respondidas com mais segurança com auxílio de uma ferramenta de simulação” (CORRÊA *et al*, 2007). Assim, tratar dos benefícios da TOC através do uso de um recurso de simulação computacional se mostra oportuno.

Dessa forma, complementar as lacunas identificadas pelos autores citados serve de justificativa teórica para este trabalho. Além disso, como justificativa prática para este estudo, há o interesse em aumentar a aceitação da TOC principalmente pelos níveis gerenciais, como igualmente destacado por Watson (2007). Do mesmo modo, para Pacheco (2014), a investigação quanto ao balanceamento de fluxo e de capacidade é pertinente aos gestores, pois contribui no processo de tomada de decisão em manufatura, sobretudo quanto à definição de investimentos e ao planejamento da capacidade produtiva.

Este trabalho fundamenta-se na otimização de sistemas de produção, relacionado com as áreas Processos Produtivos Discretos e Contínuos: procedimentos, métodos e sequências e Modelagem, Simulação e Otimização propostas pela ABEPRO. Ademais, este estudo tem como base o problema: “As melhorias caracterizadas como resultado da aplicação da lógica tambor-corda-pulmão e de princípios da TOC, descritos para qualquer arranjo de sistema de produção, podem ser verificadas em um sistema de produção arranjado por produtos?”.

O objetivo geral deste trabalho consiste em investigar os benefícios da aplicação dos princípios da TOC, apresentados no livro “A Meta”, a um sistema de produção arranjado por produtos, com auxílio de simulação computacional. Ademais, este estudo tem como objetivos

específicos sistematizar os eventos descritos em “A Meta” e conferir a influência das variáveis localização do recurso restritivo ao longo do fluxo de produção, excesso de capacidade antes e depois do recurso restritivo e aumento de capacidade do recurso restritivo nas medidas “ganho” e “inventário” a partir da simulação de diferentes cenários. Assim, espera-se atestar a eficácia e os benefícios gerados através da aplicação de princípios da TOC a sistemas de produção.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção traz uma revisão da literatura referente às principais questões tratadas neste estudo, em especial em relação à TOC e à metodologia de modelagem e simulação.

2.1 Teoria das Restrições

A Teoria das Restrições (TOC) foi desenvolvida há mais de 30 anos como uma abordagem científica para melhorias em sistemas (COX III *et al*, 2014). Em geral, a TOC é uma metodologia adotada para assistir a gestão de mudanças em organizações, baseando-se em lógica e ferramentas analíticas, na crença de que organizações, enquanto sistemas, podem ser sujeitos de melhoria contínua a longo prazo (DAVIES *et al*, 2005). Conforme Rahman (1998), o princípio de funcionamento da TOC proporciona foco para a melhoria contínua de processos. Já para Golmohammadi e Mansouri (2015) a TOC é uma filosofia de operações que se concentra nas restrições de um sistema a fim de melhorar a sua produtividade total.

A aplicação da TOC teve início com o sistema de programação *Optimized Production Timetables* (GOLDRATT, 1980) e, posteriormente, desenvolveu-se no software *Optimized Production Technology* (OPT) (RAHMAN, 1998; TULASI; RAO, 2012; LIBRELATO *et al*, 2013). A TOC teve suas ideias disseminadas em forma de romance no livro “A Meta” (GOLDRATT; COX, 1984), e foi considerada uma grande inovação como abordagem de produção (COSTAS *et al*, 2015). Entretanto, desde então, a TOC evoluiu em termos de propostas para programação de produção, não mais podendo, portanto, ser vista como sinônimo do método proposto no OPT (SOUZA, 2005).

Segundo a TOC, todas as organizações têm uma única grande meta, a qual se resume a ganhar dinheiro, no presente e no futuro; logo, ações que levem em direção a esta meta são produtivas (GOLDRATT; COX, 2002). Conforme Şimşit *et al* (2014), a TOC baseia-se no(s) elo(s) mais fraco(s) de uma cadeia, sendo eles gargalos, que são obstáculos para que as

companhias atinjam seus objetivos. Porém, do ponto de vista da TOC, o papel das operações deve ser estimado no contexto da organização como um todo (GUPTA; BOYD, 2008).

Nessa temática, o livro “A Meta” descreve cinco passos para gerenciamento de um sistema baseado em gargalos, expostas no TOCICO *Dictionary* (COX III *et al*, 2012): (*i*) identificar a restrição do sistema; (*ii*) decidir como explorar a restrição; (*iii*) subordinar todo o sistema à decisão anterior; (*iv*) elevar a restrição sistema; (*v*) retornar ao passo 1 e evitar que a inércia se torne uma nova restrição.

A TOC se apoia na lógica tambor-pulmão-corda (TPC) (CORRÊA, 2007; TULASI; RAO, 2012), assim denominada em função dos papéis que elementos específicos exercem na programação e gestão da produção (RICKETTS, 2007). Os Recursos com Restrição de Capacidade (RRC’s) impõe o índice de produção da fábrica (SOUZA, 2005) e representam um Tambor, primeiro elemento da metodologia TPC, por definir o ritmo dos outros elementos do sistema (RICKETTS, 2007). Em seguida, há um pulmão (de tempo), o qual protege de variações aleatórias a planificação do tambor e de expedição (WAHLERS; COX III, 1994). Por fim, um mecanismo de corda controla a liberação de matéria prima, assegurando-se que tarefas não sejam liberadas antes que o pulmão do gargalo ordene a necessidade (BETTERTON; COX III, 2009; COX III, 2012).

Segundo Georgiadis e a Politou (2013), a metodologia TPC visa sincronizar recursos e utilização de material em um sistema, equilibrando seu uso a níveis que contribuam com a habilidade de alavancar o ganho (TULASI; RAO, 2012). De todo modo, mudanças em um ambiente de manufatura referentes à variabilidade inerente em chão de fábrica influenciam na sua performance (GONZALEZ *et al*, 2010). Diante disso, conforme Chakravorty e Atwate (2005), a programação TPC identifica o recurso restritivo primário do sistema a fim de desenvolver um programa que garanta alta taxa de utilização deste recurso bem como excesso de capacidade nos outros recursos, com o propósito de absorver atrasos causados por disruptões. A decisão quanto à liberação de materiais interfere em onde ocorrerão e quão grande serão as filas e, como consequência, no tempo necessário para completar ordens de produção (GOLDRATT, 2009). Assim, os pressupostos da TOC para absorver o efeito da variabilidade passam pelo posicionamento de pulmões e excedente de capacidade para proteger os recursos restritivos e, por consequência, o sistema produtivo (PACHECO *et al*, 2014).

Segundo a metodologia TPC, deve-se entender a relação entre recursos gargalos e não gargalos (CORRÊA, 2007), que pode ser expressa em nove princípios: (*i*) balancear fluxo e não capacidade; (*ii*) o nível de utilização de um não-gargalo não é determinado pelo seu

próprio potencial, mas por outras restrições do sistema; (iii) utilização e ativação de um recurso não são sinônimos; (iv) uma hora perdida em um gargalo é uma hora perdida no sistema todo; (v) uma hora ganha em um não-gargalo é apenas uma miragem; (vi) gargalos governam o ganho e o inventário no sistema; (vii) o lote de transferência pode não ser, e muitas vezes não deveria ser, igual ao lote de processamento; (viii) o lote de processamento deveria ser variável, e não fixo; (ix) a programação de atividades e a capacidade produtiva devem ser consideradas analisando-se as restrições simultaneamente, *lead-times* são um resultado da programação e não podem ser predeterminados.

Uma vez realizadas as intervenções como proposto pela TOC, podem ser utilizadas medidas de performance para avaliar a evolução do sistema de produção. As medidas financeiras de lucro líquido, retorno sobre o investimento e fluxo de caixa são consideradas medidas globais de performance (GOLDRATT; COX, 2002). Entretanto, apesar de a TOC utilizar tais medidas, ela define que não são suficientes para o nível de subsistemas, e por isso faz uso de medidas operacionais (ŞIMŞIT *et al* 2014). A TOC propõe três medidas operacionais (GOLDRATT; COX, 2002; GOLDRATT; FOX, 1989; COX III *et al*, 2012):

- *Ganho*: taxa pela qual o sistema gera receita através de vendas;
- *Inventário*: todo dinheiro investido no sistema, como equipamentos, instalações, matéria prima, produtos em processamento e produtos acabados.
- *Despesa operacional*: todo dinheiro que a organização utiliza para transformar inventário em ganho e atingir a meta.

Essas medidas vinculam o impacto de decisões locais ao objetivo da companhia de ganhar dinheiro (GUPTA; BOYD, 2008). Assim, o objetivo de uma organização deve ser aumentar seu ganho reduzindo seu inventário e suas despesas operacionais (SOUZA, 2005; TULASI; RAO, 2012). Portanto, as três medidas operacionais servem para focalizar as atividades de melhoria bem como alcançar um ótimo global (TULASI; RAO, 2012).

2.2 Modelagem e simulação

Dado que um sistema consiste em um conjunto de elementos trabalhando em direção a um objetivo, modelos podem ser usados a fim de obter-se entendimento a seu respeito, e a simulação computacional imita suas operações e processos internos ao longo do tempo podendo-se, assim, tomar conclusões acerca do seu comportamento (KELTON *et al*, 2014). Segundo Bevilacqua e Ciarapica (2012) *apud* Bevilacqua *et al* (2013), a simulação representa uma ferramenta frequentemente utilizada para observar o comportamento de um sistema de

produção a fim de ressaltar seus níveis de eficiência e avaliar novas soluções de gerenciamento em um tempo relativamente curto. A partir da detecção de gargalos, a simulação pode auxiliar o processo de manufatura global e criar um melhor fluxo de trabalho, resultando em mais produtividade através de menos investimento (LEMESSI *et al*, 2012).

Uma vantagem dos modelos de simulação equivale na sua capacidade de proporcionar estimativas a respeito da eficiência e eficácia de um sistema e estimar o impacto de diferentes parâmetros de entrada na performance resultante, sem a necessidade de análises reais, o que nem sempre é possível (BERTOLINI *et al*, 2011; GRASAS *et al*, 2013). Conforme Chwif (1999), a simulação é o método que melhor se aplica para a análise de um dado sistema, devendo-se seguir certos passos a fim de que o estudo de simulação seja bem-sucedido.

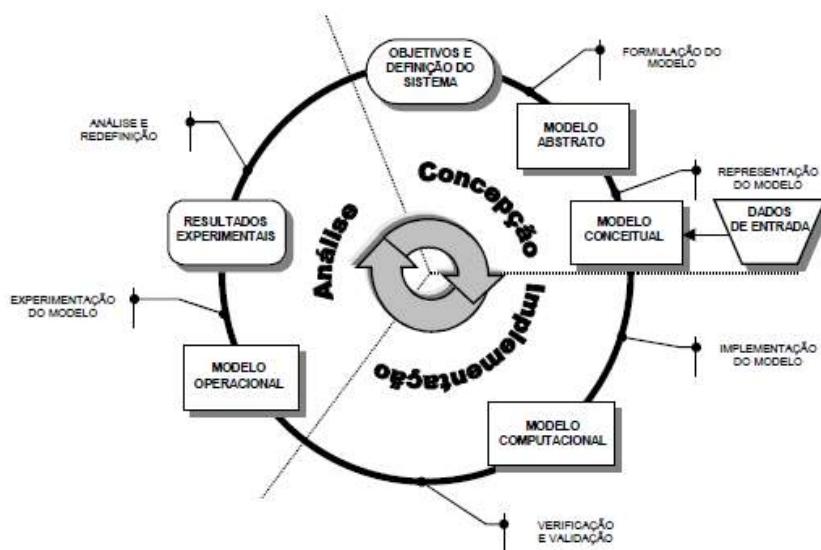
Law (2003) evidencia uma abordagem guiada por 7 passos para conduzir um estudo de simulação com sucesso: (*i*) formulação do problema; (*ii*) coleta de dados e construção de um modelo conceitual; (*iii*) Validação do modelo conceitual; (*iv*) programação do modelo computacional; (*v*) validação do modelo computacional; (*vi*) planejamento, condução e análise dos experimentos de simulação; (*vii*) documentação dos resultados da simulação. Segundo o autor, na metodologia de simulação, a programação do modelo representa de 25 a 50% de todo o trabalho de um estudo de simulação. Chwif (1999) justamente afirma que a simulação envolve muito mais que a simples construção de um programa, sendo esta atividade apenas uma dentre as inúmeras atividades de um estudo de simulação.

Harrell *et al* (2012), de modo semelhante, afirmam que a simulação é muito mais que a construção e a execução de um modelo e que, para que projetos de simulação obtenham sucesso, devem ser bem planejados e coordenados. Os autores recomendam 6 passos gerais a serem tomados: (*i*) Definição dos objetivos e planejamento do estudo; (*ii*) Coleta e análise dos dados do sistema; (*iii*) Construção do modelo; (*iv*) Validação do modelo; (*v*) Condução de experimentos; (*vi*) Apresentação dos resultados. Os autores destacam que cada passo não precisa necessariamente ser terminado antes de seguir ao próximo, pois o procedimento de uma simulação é iterativo e atividades podem ser refinadas ou redefinidas a cada iteração.

Chwif (1999), por sua vez, divide o ciclo de vida de estudos de simulação em três grandes etapas, sendo elas: (*i*) Concepção ou formulação do modelo; (*ii*) Implementação do modelo; (*iii*) Análise dos resultados do modelo. Além disso, conforme esse ciclo, inicialmente, define-se o objetivo almejado com o estudo bem como reúnem-se informações acerca do sistema que será modelado. Em seguida, na tradução das informações em um modelo conceitual, determinam-se os dados de entrada necessários. Então, o modelo é traduzido para um modelo computacional, o qual deve ser comparado com o modelo

conceptual a fim de ser validado, certificando-se que corresponde ao sistema definido. Finalmente, os experimentos de simulação são rodados e efetua-se a análise e interpretação dos resultados. Este ciclo de vida é apresentado na Figura 1, em seguida.

Figura 1 - Ciclo de vida de um modelo de simulação



Fonte: Chwif (1999).

Harrell *et al* (2012) afirmam que, do ponto de vista da simulação, os elementos que constituem um sistema são entidades de entrada e de saída, atividades, recursos e controles. Entidades referem-se aos itens processados ao longo sistema. Atividades consistem nas tarefas realizadas, direta ou indiretamente ligadas ao processamento de entidades. Recursos, por sua vez, correspondem aos meios pelos quais as atividades são realizadas, podendo ser animados, como operadores, ou inanimados, como equipamentos. Por fim, controles ditam como, quando e onde atividades devem ser efetuadas, impondo ordem ao sistema.

2.3 Teoria das Restrições e simulação

Pesquisas acerca da eficiência da TOC através da abordagem TPC para programação em sistemas de manufatura receberam crescente atenção ao longo da década de 2000 (GEORGIADIS e POLITOU, 2013). Betterton e Cox III (2009) declaram que inclusive muitos estudos de simulação quanto ao método TPC têm sido publicados desde os anos 1990. Qiao e Wu (2013), igualmente, afirmam que muitos estudos referentes à obtenção de melhores decisões para a produção incluem a adoção de tecnologias de simulação.

Nembhard e Prichanont (2007) estudaram a TOC através de simulação em ambientes de produção em série com estações de trabalho heterogêneas utilizando-se de trabalhadores multifuncionais. Os autores levantaram a hipótese de que a posição do gargalo poderia afetar os níveis de WIP e de utilização de operadores da linha considerada, o que potencialmente levaria a efeitos no aprendizado dos operadores quanto às atividades sem, contudo, ter necessariamente menos efeito na performance global do sistema, uma vez que o tempo de ciclo de saída é limitado pela estação gargalo, independentemente da sua posição. Os resultados indicaram que, com o gargalo a jusante, os trabalhadores ficaram menos frequentemente ociosos e, portanto, foram capazes de melhorar as operações mais rapidamente. Com o gargalo a montante, entretanto, os operadores ficaram mais ociosos.

Além disso, de acordo com Souza e Pires (2014), a produção para estoque (*Make to Stock - MTS*) de produtos padronizados para serem vendidos posteriormente traz consigo a imprevisibilidade do futuro. Os autores desenvolveram um estudo a fim de demonstrar a forma através da qual a TOC planeja e controla a produção em ambientes MTS, com o intuito de garantir alta disponibilidade de produtos acabados com relativos baixos níveis de estoque. Um dos elementos cruciais identificados para o ambiente retratado é manter um nível suficiente de capacidade protetiva. Os autores concluíram que a abordagem da TOC em ambientes MTS possui certos elementos que se assemelham a outros sistemas de gestão de operações, apesar de diferenciarem-se em certos aspectos, como o fato de sistemas MTS estarem em consonância com a abordagem de Controle de Carga (*Workload Control – WLC*) de maneira bastante particular e o fato de assemelhar-se a sistemas puxados ainda que, igualmente, de modo bastante particular através do uso de controles de carga de trabalho, do status do pulmão para definir prioridades no chão do fábrica, do gerenciamento dinâmico dos pulmões para ajustar os níveis alvos de estoque, além de outras especificidades operacionais.

Mais recentemente, Thürer *et al* (2017) igualmente utilizaram-se de simulação para avaliar o impacto da posição do gargalo em um ambiente *flow shop*. O modelo dos autores consiste em uma *flow shop* com sete estações de trabalho dentre as quais uma é um gargalo, e onde cada item a ser processado passa por cada uma das estações na mesma sequência. Os autores utilizaram como controles a metodologia TPC, WIP constante (ConWIP) e diferentes métodos de controle da carga de trabalho baseados na liberação de material.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho aplica ao modelo de um sistema de produção descrito em Corrêa (2007) algumas das melhorias propostas no ambiente produtivo descrito no livro “A Meta” (GOLDRATT; COX, 2002). “A Meta” narra o funcionamento de uma fábrica em dificuldades, e a TOC é apresentada pelo autor ao passo que ocorrem transformações. Os princípios foram aplicados a um sistema de produção arranjado por produtos, descrito posteriormente. O sistema de produção narrado constituiu o modelo abstrato adotado.

Quanto à sua natureza, este trabalho se caracteriza como uma pesquisa aplicada, uma vez que tem interesse na aplicação, utilização e consequências práticas dos conhecimentos (GIL, 2008). Quanto a seus objetivos, esta pesquisa se classifica como explicativa, dado que objetiva demonstrar a razão do funcionamento da TOC, assim como identificar fatores e variáveis que afetam o processo (GIL, 2008; SANTOS, 2007). Quanto à sua abordagem, este estudo consiste em uma pesquisa combinada, associando aspectos qualitativos e quantitativos na elaboração e na análise do modelo de simulação e complementando concepções metodológicas (MARTINS, 2012). Em relação aos seus procedimentos, este trabalho adota a metodologia de modelagem e simulação, utilizando técnicas analíticas e experimentais a fim de identificar relações causais entre variáveis de controle e variáveis de desempenho através de desenvolvimento, análise e teste (NETO; PUREZA, 2012).

Para este estudo, após leitura sistemática do livro “A Meta” a fim de reconhecer o cenário tratado, foram seguidas, como referências, as etapas de um estudo de simulação abordadas por Chwif (1999), Law e Kelton (1991), Law (2003) e Harrell *et al* (2012), a seguir sumarizadas:

- (i) Leitura sistemática: Análise dos eventos descritos em “A Meta” e sua causa, contexto e ações tomadas, correspondente ao modelo abstrato e apresentada no Apêndice A;
- (ii) Formulação do problema: Definição do sistema de produção (SP) a ser retratado, a partir de adaptação do cenário do livro “A Meta” e de modelo proposto por Corrêa (2007), caracterizado na seção 3.3.2;
- (iii) Formulação do modelo conceitual: Identificação dos dados necessários para elaboração do modelo computacional, definindo-se entidades de entrada e de saída, atividades, recursos e parâmetros de controle do sistema. Além disso, serão identificadas as variáveis as quais deseja-se analisar;
- (iv) Concepção do modelo computacional: Desenvolvimento do modelo em ambiente computacional com apoio do *software Flexsim*, a partir do modelo conceitual;

- (v) Verificação e validação do modelo: Comparação do modelo concebido com o modelo conceitual definido, a fim de verificar se ambos estão em acordo e refletem o sistema resultante de “A Meta”;
- (vi) Experimentação do modelo: Condução de experimentos no *software Flexsim* para diferentes cenários;
- (vii) Documentação dos resultados experimentais: Descrição dos resultados;
- (viii) Análise: Avaliação dos resultados, discussão e conclusões acerca da eficácia da Teoria das Restrições.

3.1 Sistematização do livro “A Meta” e formulação do problema

A leitura e análise dos acontecimentos de “A Meta” permitiu a sistematização de eventos narrados em quatro cenários principais, conforme Apêndice A. O cenário inicial traduz a situação introdutória descrita para a fábrica, que consiste em um ambiente de atrasos de pedidos, grande quantidade de inventário em processo e possibilidade de encerramento das atividades. Em seguida, decorrente disso, no segundo cenário, de aplicação da TOC, após tomada de ações se observam melhorias, porém ainda há obstáculos no funcionamento do sistema. Então, alcança-se um terceiro cenário, após aplicação da TOC, em que ainda são feitas intervenções para a melhoria contínua. Por fim, o livro descreve outras medidas que ainda podem vir a ser tomadas, caracterizando um cenário futuro almejado. Destaca-se que, para este trabalho, consideraram-se as ações descritas nos três primeiros cenários.

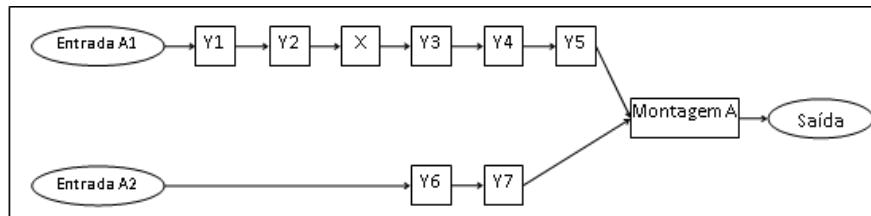
Tal sistematização, associada ao modelo de sistema produtivo apresentado em Corrêa (2007), serviu de inspiração e permitiu a formulação do problema e a construção de um modelo abstrato, primeiras etapas da metodologia de modelagem e simulação, além da formulação do modelo conceitual a ser investigado.

3.2 Modelo conceitual

O arranjo funcional e as premissas do modelo conceitual foram obtidas a partir de adaptação de um modelo arranjado por processos proposto por Corrêa (2007). O SP analisado envolve uma montagem final, abastecida por dois subsistemas paralelos, ver Figura 2. “Y” e “X” correspondem às máquinas do sistema. “X”, em especial, representa a operação gargalo, uma vez que no cenário da fábrica descrita em “A Meta” o sistema não é capaz de atender a demanda. O subsistema que contém “X” processa as peças do tipo A1, enquanto o outro

subsistema processa as peças do tipo A2. As “Entradas” representam os estoques de matéria prima, dos quais é feita a liberação de material para processamento.

Figura 2 - Modelo conceitual do SP - Cenário Inicial



Fonte: Autor (2017).

A interdependência sequencial e pré-determinada entre processos permite caracterizar cada subsistema como uma linha de produção de modelo único (rota fixa e relação de precedência entre estações) ao reduzir os lotes a uma unidade, abastecendo uma linha de montagem final. Destaca-se que não foram objetos de estudo deste trabalho o tempo de *setup* nos processadores bem como não foram testados diferentes *mix* de produção e, consequentemente, o sequenciamento de produtos.

As entidades entrantes são peças de dois tipos, denominadas A1 e A2. As entidades de saída são unidades do produto A constituído pela montagem de A1 e A2. O tempo entre chegada de peças é de 1 minuto, constituindo uma taxa de 60 peças/hora. Ainda, estipulou-se o tempo de simulação como 28.800 minutos, correspondente a 3 meses de trabalho tal como em “A Meta”, considerando 4 semanas/mês, 5 dias/semana, 8 horas/dia, 60 minutos/hora.

As atividades realizadas pelo SP são o processamento de peças a cada estação de trabalho e a espera por processamento. Os recursos utilizados são as máquinas processadoras, em um total de 8, dentre as quais uma é um gargalo de produção, um *Combiner*, responsável pela montagem dos produtos, e também as filas de espera, que organizam o inventário em processo. Além desses, consideraram-se a entrada e saída de itens do sistema. Entretanto, a fim de simplificação, não foram considerados recursos móveis na movimentação de material.

Os controles do SP analisado, por sua vez, foram obtidos da narração de “A Meta” após etapa de identificação do gargalo. Esses são as taxas de entrada e saída do sistema, a sequência de operações, o tamanho do estoque pulmão e a quantidade de peças aguardando montagem.

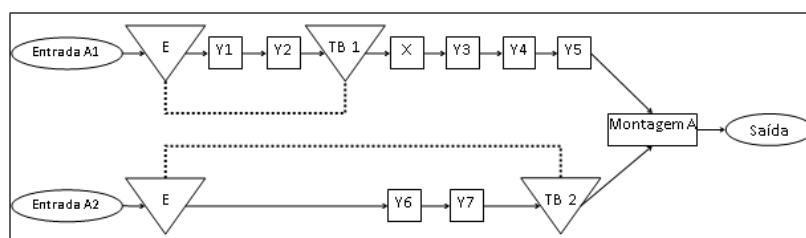
Com a finalidade de viabilizar a construção do modelo, dados como taxa de entrada, taxa de saída, tempos de processamento e capacidade dos recursos foram definidos

deterministicamente pelo autor do presente trabalho, visto que não são precisados no livro “A Meta” nem no modelo de Corrêa (2007). Esse modelo conceitual foi analisado para as situações I e II, respectivamente determinística e probabilística (probabilística antes da TOC). A liberação de material e o processamento pelas máquinas foram ajustados de modo a representar a produção descrita no modelo abstrato.

Ao sistema inicial foi imposto um conjunto de alterações descritas em “A Meta”, segundo princípios da TOC, resultando na situação III (probabilística após TOC). A primeira alteração foi a variação na capacidade do gargalo para incrementar a capacidade do SP. A segunda foi a introdução de um estoque pulmão antes do gargalo e um antes da montagem final. A terceira foi a incorporação da corda entre pulmões e liberação de material, através da regulagem entre taxa de entrada de itens e gargalo.

As modificações foram baseadas nas ações descritas no Apêndice A e nos passos para o gerenciamento de gargalos retratados por Cox III *et al* (2012) após identificação do gargalo. A Figura 3 indica o SP após alterações. Nessa situação, “TB 1” corresponde ao estoque pulmão que visa proteger o gargalo do SP, enquanto “TB 2” representa o estoque pulmão com peças não oriundas do gargalo, mas com a função de proteger a operação de montagem de eventuais atrasos. Além do mais, na situação I, considerou-se para TB 1 uma capacidade máxima de 70.000 unidades, a fim de permitir que o sistema funcionasse livremente.

Figura 3 - Modelo conceitual do SP – Cenário após TOC



Fonte: Autor (2017).

Foram efetuadas modificações entre as situações e alterados o aumento de capacidade do gargalo, o tamanho dos estoques-pulmão e o excesso de capacidade antes e depois do gargalo. A Figura 4 sistematiza as três situações que foram investigadas, sendo indicado no Apêndice B o tempo de processamento determinístico e probabilístico (segundo uma distribuição normal) e percentagem de ativação dos recursos para as 3 situações consideradas.

Figura 4 - Situações de simulação

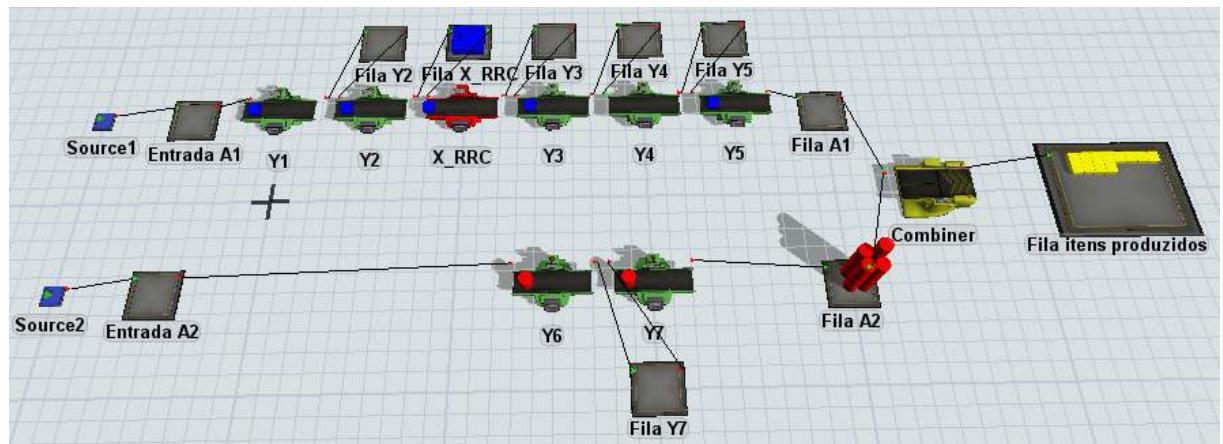
Situação	Modelo
I	Determinístico
II	Probabilístico
III	Probabilístico + Alterações descritas em “A Meta”

Fonte: Autor (2017).

3.3 Construção, verificação e validação do modelo computacional

Conforme planejado, o *software FlexSim* foi utilizado para desenvolver o sistema em ambiente computacional, utilizando o modelo conceitual como base. Com o objetivo de retratar um ambiente fabril, o modelo conta com duas fontes, uma para cada entidade entrante, as quais representam o almoxarifado. O modelo computacional elaborado pode ser observado na Figura 5, a seguir, bem como conforme situação de simulação considerada nos Apêndices C, D e E.

Figura 5 - Modelo computacional no *software FlexSim*



Fonte: Autor (2017).

As máquinas foram representadas por processadores segundo disposição (Y1, Y2, ...). Além disso, as filas correspondem aos estoques intermediários em processamento, localizadas entre os processadores ou aguardando por montagem (fila Y1, fila Y2, ...). Ainda, o modelo conta um recurso do *software* denominado *Combiner*, utilizado para reproduzir a montagem das entidades A1 e A2, originando o produto A. As entidades A1 são geradas na cor azul e as entidades A2 na cor vermelha. Ao passarem pelo *Combiner*, o produto A sai na cor amarela, a fim de caracterizar a montagem.

A situação I teve seus dados definidos deterministicamente. Posteriormente, para a situação II, os dados foram alterados conforme distribuição estatística apresentada no Apêndice B, introduzindo-se variabilidade de 20% em todos os recursos. Por fim, com o propósito de caracterizar a TOC na situação III, além da variabilidade, limitou-se a quantidade permitida de itens em processamento na fila anterior ao gargalo (X_RRC) a um conteúdo máximo 3 unidades, em função do tempo entre liberação de material e tempo percorrido até chegada à fila e seu processamento. Igualmente, limitou-se o tamanho das filas anteriores ao gargalo a 2 unidades bem como a fila de entidades A2 aguardando montagem a 3 unidades conforme capacidade do gargalo. Assim, qualificaram-se os elementos tambor, pulmão e corda.

Após sua concepção, o modelo foi verificado e validado. Para tanto, avaliou-se a geração de cada entidade em sua respectiva fonte de acordo com a distribuição estatística definida bem como a ordem de processamento que devia ser seguida. Igualmente, verificou-se se ambas entidades chegavam ao *Combiner* e eram unidas conforme desejado. Ainda, analisou-se se eram formados estoques em espera onde era previsto, ou seja, antes do recurso gargalo e antes da montagem final. Para acompanhar os resultados gerados, através do *dashboard* do programa, criaram-se gráficos para contabilizar e ilustrar a quantidade total de itens gerada no final do sistema e a quantidade de itens em processamento, representada pela soma da média de itens na fila anterior ao gargalo e na fila anterior à montagem final, uma vez que estas representavam as filas críticas do sistema.

3.4 Experimentação

A condução de experimentos foi dividida em duas etapas. A primeira etapa consistiu na introdução de variabilidade de 20% no desvio padrão entre as situações determinística e probabilística (Figura 4 e Apêndice B), com o objetivo de identificar em qual situação o sistema teria o melhor desempenho. Nessa primeira etapa, para cada uma das três situações simuladas, almejou-se analisar a influência que as ações tomadas tiveram nas medidas operacionais propostas pela TOC (ganho, inventário e despesa operacional). A medida ganho foi avaliada a partir da variável Total de Itens Produzidos do produto A no período considerado, ou seja, uma medida de capacidade de produção (quanto mais itens produzidos, maior o ganho). O inventário, da mesma maneira, foi avaliado a partir da média de itens em processamento nas filas, ou seja, *work in process* (WIP) observados no sistema ao final do período. As despesas operacionais foram consideradas constantes e iguais em todas as

situações, supondo, assim como no livro “A Meta”, que não houve custos adicionais para produzir as alterações entre as situações II e III. Assim, as três situações foram comparadas entre si analisando-se o Total de Itens Produzidos ao final do período de simulação e o WIP presente no sistema.

Em seguida, a segunda etapa fundamentou-se na condução de planejamento experimental e realizou-se uma experimentação modificando-se a posição e o tempo de processamento do gargalo a fim de analisar as mudanças que essas alterações trariam e identificar o melhor ajuste. A modificação dos parâmetros do planejamento experimental gerou 9 cenários os quais são detalhados na seção 4.2 Por fim, realizou-se uma análise de variância das variáveis Total de Itens Produzidos e WIP a fim de identificar a situação ideal quanto à posição do gargalo e quanto ao tempo de processamento para que o Total de Itens Produzidos seja ampliado e a quantidade de WIP seja reduzida. Além disso, os resultados do trabalho foram analisados e comparados com os princípios descritos na literatura bem como com demais estudos relacionados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção traz os resultados referentes aos experimentos conduzidos no modelo de simulação.

4.1 Primeira etapa de experimentos

Inicialmente, efetuou-se uma rodada preliminar com uma amostra piloto de 10 repetições através da ferramenta *Experimenter* do próprio *software* para analisar o total de itens que seriam produzidos em média a fim de constatar um erro que seria baixo, contudo, aceitável. Constatou-se que o total de itens produzidos se aproximou de 14.000 unidades. Assim, estabeleceu-se, deterministicamente, um erro admitido de 10 unidades e um intervalo de confiança de 95%. Posteriormente, em uma nova rodada preparatória, investigou-se os resultados das variáveis decisórias (Total de Itens Produzidos e WIP) ao longo tempo de simulação através de um gráfico Conteúdo X Tempo no *dashboard* do programa. Percebeu-se que, quanto mais tempo passava-se, mais aumentava a quantidade de WIP e a quantidade total de itens produzidos, caracterizando uma relação linear. Por conseguinte, não havendo instabilidade e o crescimento mostrando-se linear, concluiu-se que não seria necessário tempo de *warm-up* para o modelo.

Em seguida, teve-se de identificar o número de repetições que seriam necessárias para obter-se o erro estabelecido para o intervalo de confiança. Para tanto, avaliou-se o total de itens que chegavam à fila posterior à montagem, a média de itens que chegavam à fila anterior à montagem e deviam aguardar e a média de itens que chegavam à fila anterior ao gargalo.

O erro gerado foi calculado para as variáveis analisadas para as situações II e III (desconsiderou-se a situação I por ser determinística) e, assim, calculou-se o número ótimo de repetições que seria necessário para obter um erro de 10 unidades e um sistema estável. Para a situação II, o número de repetições necessárias foi de $n=18$ e, para a situação III, $n=19$. À vista disso, constatou-se que o maior número de repetições seria necessário para a situação III e arredondou-se o valor encontrado com folga para cima, assim adotando-se $n=25$ repetições a fim de obter-se um sistema estável para todas as variáveis em todas as situações. A Figura 6 ilustra os resultados encontrados após as 25 rodadas de cada uma das situações consideradas.

Figura 6 - Resultados da simulação

Situação	Média total de itens	Desvio padrão média total de itens	Média WIP	Desvio padrão média WIP
I	14396,00	0,00	14399,50	0,00
II	14388,92	21,24	14341,86	32,87
III	14401,68	22,65	5,99	0,00

Fonte: Autor (2017).

Posteriormente, conduziu-se uma comparação entre médias a partir de teste T-pareado para as variáveis de decisão estudadas, consideradas 25 repetições. Tal teste teve por objetivo identificar se havia diferença estatisticamente significante entre as situações e, em caso afirmativo, qual situação era preferível. A comparação foi feita a partir da diferença de cada observação individual entre as situações I e II (situação I – situação II). A Figura 7 demonstra a comparação entre as médias das diferenças das situações I e II para as variáveis Total de Itens Produzidos e WIP médio.

Figura 7 - Comparação de médias entre situações I e II

DIFERENÇA DE MÉDIAS	Erro	Limite inferior	Média	Limite superior
Total de itens produzidos	8,77	-1,69 < 7,08 < 15,85		
WIP Médio	13,57	44,07 < 57,64 < 71,21		

Fonte: Autor (2017).

Percebe-se que, para essa comparação, a variável Total de Itens Produzidos não indicou diferença entre as situações I (determinística) e II (probabilística), uma vez que o intervalo definido contém o zero, ou seja, não se pode afirmar que a diferença média não seja igual a zero. Entretanto, houve diferença entre as situações no que diz respeito à quantidade média de itens em processamento nas filas antes do gargalo e antes da montagem final, pois o intervalo definido não contém o zero. Destaca-se que o erro de 13,57 unidades para o WIP é considerado aceitável, uma vez que corresponde às 2 filas críticas consideradas representantes do sistema. A seguir, a Figura 8 ilustra a mesma comparação para as situações II e III.

Figura 8 - Comparação de médias entre situações II e III

DIFERENÇA DE MÉDIAS	Erro	Limite inferior	Média	Limite superior
Total itens produzidos	11,61	-24,37 < -12,76 < -1,15		
WIP médio	13,57	14322,30 < 14335,87 < 14349,44		

Fonte: Autor (2017).

Neste momento, a comparação foi feita a partir da diferença de cada observação individual entre as situações II e III (situação II – situação III). Observa-se que, para as variáveis analisadas, os intervalos de confiança determinados não contêm o zero. Logo, constata-se que há diferença entre as situações II e III para ambas as variáveis. Os valores negativos indicam que, na situação III, a quantidade total de itens produzidos foi maior e a quantidade média de itens em processamento foi menor, sendo, assim, esta a melhor situação dentre as três situações analisadas. Em relação ao Total de Itens, a diferença entre as situações II e III, em princípio, não era esperada, uma vez que o gargalo, em ambas as situações, estava operando a 100% da sua capacidade. Nesse sentido, essa diferença pode ser atribuída a um erro numérico referente ao número de repetições utilizadas.

É possível fazer um paralelo entre os resultados obtidos e os princípios descritos por Corrêa (2007) para a gestão de sistemas através da TOC. Todavia, destaca-se que nem todos os princípios puderam ser diretamente verificados através do modelo de sistema deste trabalho.

O princípio (i) diz que se deve balancear fluxo e não capacidade, e no modelo deste trabalho, justamente, não foi regulada a diferença entre cada recurso, e sim o fluxo dadas as capacidades. Isto foi feito através do elemento corda, ou seja, estipulando-se que os recursos trabalhem de acordo com a capacidade do gargalo e não por suas capacidades individuais.

Estabeleceu-se um pulmão de tempo mais uma folga de 1 minuto e, com isso, constituiu-se um ritmo, privilegiando o fluxo e não a capacidade do recurso.

O princípio (*ii*) estabelece que o nível de utilização de um não-gargalo não deve ser determinado pelo seu próprio potencial, mas por outras restrições do sistema, o que foi realizado na situação III. O princípio (*iii*), por sua vez, infere que utilização e ativação de um recurso não são sinônimos. Essa análise aborda, ao mesmo tempo, os princípios (*ii*) e (*iii*). O modelo foi ajustado para que o nível de utilização do gargalo fosse alto e que os demais recursos se ajustassem a ele. Ao longo da Situação II, os recursos anteriores ao gargalo (Y1, Y2) tiveram utilização de 100% e os recursos do outro subsistema (Y6, Y7) igualmente tiveram alta taxa de utilização, de 99,8% a cima. Os demais recursos (Y3, Y4, Y5) tiveram utilização menor que a do gargalo (50%). Já para a simulação da Situação III todos os recursos não restritivos anteriores ao gargalo e os demais do outro subsistema foram submetidos a ele. Quanto aos recursos posteriores ao gargalo, não foi preciso modificar coisa alguma, pois como estão posicionados após, têm capacidade de recuperar eventuais atrasos decorrentes da variabilidade do sistema. A utilização média do gargalo foi 99,97% ou superior. Pôde-se observar que todos os recursos anteriores e posteriores ao gargalo tiveram utilizações abaixo de 100%, variando entre 49,9% e 50,1%, inclusive no subsistema em paralelo. Diante disso, percebe-se que os recursos não restritivos estavam disponíveis, porém não foram usados.

O princípio (*iv*) diz que uma hora perdida em um gargalo é uma hora perdida no sistema todo. No modelo, nas 3 situações, o tempo de processamento do gargalo foi sempre o mesmo e este foi utilizado a 100% de sua capacidade. Então, não foi possível testar a perda de tempo no gargalo. Contudo, merece maior aprofundamento os motivos da diferença no Total de Itens entre as situações II e III. Mesmo que o gargalo sofresse parada, ou seja, perdesse tempo, deveria ter a mesma produção que a situação II.

O princípio (*v*), que afirma que uma hora ganha em um não-gargalo é apenas uma miragem, está exatamente relacionado com o princípio anterior, pois o incremento de capacidade em recursos não restritivos (por exemplo, através da redução do tempo de processamento) não faria sentido, uma vez que é o gargalo o responsável pelo ritmo do sistema como um todo e não traria resultados.

Já o princípio (*vi*) afirma que são os gargalos que governam o ganho e o inventário no sistema. Na situação de simulação III, por exemplo, os ganhos não foram tão expressivos quanto seriam se houvesse lotes de produção, contudo, ainda assim verificou-se uma redução na quantidade de inventário ao longo do sistema quando arranjado conforme a TOC. Isto pode

igualmente ser discutido através do princípio (*vii*), que afirma que o lote de transferência pode não ser, e muitas vezes não deveria ser, igual ao lote de processamento. Porém, como o lote de transferência teve tamanho de apenas uma unidade, o princípio não pôde ser testado. Idem para o princípio (*viii*), que enuncia que o lote de processamento deveria ser variável, e não fixo.

Por fim, o princípio (*ix*) diz que a programação de atividades e a capacidade produtiva devem ser consideradas analisando-se as restrições simultaneamente, *lead-times* são um resultado da programação e não podem ser predeterminados. Sabe-se que *lead-times*, conforme tratados no modelo arranjado por processos de Corrêa (2007), dependem de questões de sequenciamento, o que foge do escopo da situação abordada por este trabalho em um arranjo por produtos. No modelo, na Situação II, o tempo médio de espera na fila do gargalo foi de 7165 minutos, o que aponta que, no período de 3 meses simulados, 24,9% do tempo de processamento ficou retido na fila do gargalo, retardando que um item chegue ao final do sistema e seja montado. Na situação III, o tempo médio de espera na fila do gargalo diminuiu para 6 minutos. Esses tempos indicam que o *lead time* da situação II é muito maior que na situação III, que é regulada pela TOC. Assim, através da grande discrepância do tempo de espera no gargalo, fica indiretamente comprovado esse princípio.

4.2 Segunda etapa de experimentos

Uma vez que se identificou que a Situação III de simulação, modelada de acordo com a TOC, foi a que gerou o melhor resultado, a próxima etapa consistiu na experimentação de cenários diferenciados a partir dela. Selecionaram-se os parâmetros Posição do Gargalo e Tempo de Processamento do Gargalo para serem alterados.

A posição do gargalo corresponde à sua localização ao longo do sistema produtivo adotado, podendo estar ao meio (situação inicial) ou então passar a ser o primeiro ou o último recurso do sistema. Já o tempo de processamento do gargalo, inicialmente de 2 min/un, refere-se ao incremento de capacidade proposto pela TOC, graças ao qual deve ser possível reduzir o tempo de processamento ou aumentar a taxa de produção. Assim, definiu-se uma redução do tempo de processamento para 1,5 min/un e 1,1 min/un, situação em que o recurso estaria próximo de deixar de ser um gargalo. Os diferentes ajustes de cenários experimentados podem ser observados na Figura 9 (ver Apêndices F, G, H, I, J, K, L, M, N).

Figura 9 - Cenários de experimentação, fatores e seus níveis

Cenário	Posição do gargalo	Tempo de processamento do gargalo (min)
1	Inicial	1,1
2	Inicial	1,5
3	Inicial	2
4	Intermediária	1,1
5	Intermediária	1,5
6	Intermediária	2
7	Final	1,1
8	Final	1,5
9	Final	2

Fonte: Autor (2017).

Esses parâmetros foram escolhidos para nortearem os experimentos realizados uma vez que a literatura referente à TOC narra que, em um sistema baseado em gargalos, deve-se subordinar todo o sistema à decisão de como explorar o recurso restritivo e elevar a restrição sistema (COX III *et al*, 2012). Nesse caso, a exploração do gargalo representa a decisão quanto aonde posicioná-lo e a elevação do gargalo corresponde ao aumento de sua capacidade, assim reduzindo-se seu tempo de processamento.

Cada cenário foi subordinado a 25 replicações (com intervalo de confiança de 95% e erro aceitável de 10 unidades) durante o tempo estipulado de 28.800 minutos cada replicação, com auxílio da ferramenta *Experimenter*. As variáveis de resposta controladas durante os experimentos foram as mesmas definidas anteriormente, ou seja, Total de Itens Produzidos e estoque em processamento, WIP, médio do sistema, consideradas indicadores da performance do sistema. Em todos os cenários foram consideradas as quantidades de WIP de todas as filas do sistema. Os resultados obtidos com os experimentos podem ser verificados no Apêndice O. Além do mais, salienta-se que a utilização do gargalo foi igualmente monitorada, uma vez que o objetivo de um sistema gerenciado por gargalos é manter alto seu nível de utilização.

Os resultados obtidos foram analisados com o auxílio de análise de variância (ANOVA) para os dois fatores observados (Posição do Gargalo e Tempo de Processamento do Gargalo), a fim de identificar se um fator se relaciona com o outro e qual seria o melhor ajuste. A suposição inicial foi de que o Cenário 1 seria o mais satisfatório, produzindo mais itens e acumulando menos WIP médio graças ao gargalo encontrar-se na posição inicial e ter baixo tempo de processamento, permitindo que os recursos posteriores pudessem compensar a variabilidade do sistema. Cada um dos fatores considerados teve 3 níveis e as amostras corresponderam a 25 observações para cada arranjo.

Para a variável Total de Itens Produzidos, os dados gerados ajustaram-se a uma distribuição normal (ver Apêndice P). A seguir, a Tabela 1 aponta os resultados da ANOVA.

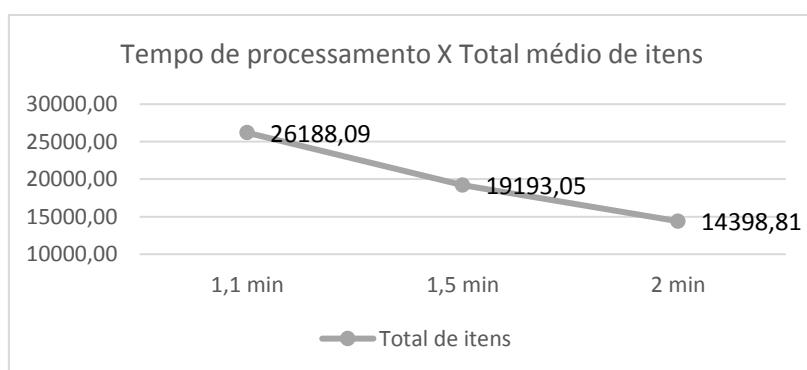
Tabela 1 - ANOVA para a variável Total de Itens Produzidos

Fonte de variação	ANOVA TOTAL DE ITENS PRODUZIDOS			Alfa	5%
	SQ	GL	QM	F calculado	F tabelado
Posição do gargalo (A)	1565,12	2,00	782,56	1,02	3,04
Tempo de processamento gargalo (B)	5272561117,44	2,00	2636280558,72	3451211,23	3,04
AB	4484,24	4,00	1121,06	1,47	2,41
Erro	164996,16	216,00	763,87		
Total	5272732162,96	224,00			

Fonte: Autor (2017).

Dado que para haver significância entre os grupos o F calculado deve ser maior que o tabelado, conclui-se que, para a variável Total de Itens Produzidos, o parâmetro Tempo de Processamento do Gargalo foi significativo. O parâmetro Posição do Gargalo, entretanto, não se mostrou significativo. Assim, conclui-se que o fator Tempo de Processamento do Gargalo afeta o Total de Itens Produzidos. O melhor ajuste pode ser obtido a partir do gráfico do fator (Tempo de Processamento do Gargalo) pela comparação de médias na Figura 10. O limite de decisão, obtido através do teste de Tukey (ver Apêndice P) foi de 18,52, indicando que o Total médio de Itens Produzidos é diferente em todos os tempos de processamento analisados e quanto menor o tempo de processamento do recurso gargalo, maior será o Total de Itens Produzidos. Logo, o melhor ajuste é o do tempo 1,1 min.

Figura 10 - Tempo de processamento do gargalo X Total médio de itens produzidos



Fonte: Autor (2017).

Esse resultado indica que quanto menor o desbalanceamento entre as estações de trabalho melhor será para o sistema. Assim, em situações determinísticas, espera-se que quanto a maior capacidade de processamento do gargalo maior será a capacidade do sistema, como comprovado também na presença de variabilidade.

Em relação à variável WIP, a plotagem dos dados indica que eles não se comportaram normalmente, pois os valores ficaram centrados ao redor de zero (ver Apêndice Q). Assim, a análise da ANOVA ficou prejudicada. De todo modo, a Tabela 2, em seguida, indica que ambos os fatores de variação foram significativos.

Tabela 2 - ANOVA para a variável WIP médio

ANOVA WIP MÉDIO		Alfa		5%	
Fonte de variação	SQ	GL	QM	F calculado	F tabelado
Posição do gargalo (A)	2069,69	2,00	1034,84	2996010,09	3,04
Tempo de processamento gargalo (B)	6,50	2,00	3,25	9411,07	3,04
AB	54,27	4,00	13,57	39278,55	2,41
Erro	0,07	216,00	0,00035		
Total	2130,53	224,00			

Fonte: Autor (2017).

Sabe-se que para a variável WIP, quanto menor ela for, melhor. Apesar dos valores muito próximos de zero, a análise dos gráficos dos resultados da experimentação (ver Apêndice Q) indica que há diferença significativa, porém não relevante, entre os cenários, pois utilizou-se uma regulagem referente à TOC para limitar o WIP no sistema. Assim, o menor WIP foi obtido no cenário com Tempo de Processamento do Gargalo de 2 min e Posição do Gargalo inicial, o que parece indicar que o restante do sistema seja capaz de recuperar atrasos devidos à variabilidade do gargalo quando este é colocado no início do sistema. Nesse cenário, o WIP médio foi de 8,01 unidades. Esse resultado indica que deveria ser investigada em maior grau a influência do número de estações após o gargalo para que a diferença seja percebida de forma mais acentuada.

Os resultados do estudo com centros de trabalho heterogêneos de Nemhard e Prichanont (2007) sugeriram que, com 50% de pessoal, com a estação gargalo a jusante, o WIP pode entrar no sistema mais rapidamente, resultando em maior saída. Ainda, os autores observaram que, em geral, os níveis de WIP permaneceram relativamente baixos, apesar de a capacidade dos *buffers* entre as estações ser ilimitada. Os autores, então, concluíram que em

sistemas com restrições a alocação de operadores multifuncionais deve ser feita levando em consideração a posição do gargalo do sistema. Os resultados encontrados neste trabalho estão em acordo com o que os autores encontraram em seu estudo, dado que para a variável de resposta WIP a posição do gargalo se mostrou significativa, o que não aconteceu para a variável de resposta Total de Itens Produzidos, o que corresponde à performance do sistema considerada pelos autores.

Considerando o Total de Itens como indicador global de performance do sistema, o resultado encontrado no presente trabalho difere do resultado encontrado por Thürer *et al* (2017), uma vez que a posição do gargalo não se mostrou estatisticamente significativa. O ambiente *flow shop* simulado por Thürer *et al* (2017) apresenta um arranjo similar ao arranjo utilizado no presente estudo. Os autores variaram a posição do gargalo nas sete posições possíveis no sistema. Entretanto, apresentaram apenas os resultados referentes ao gargalo na posição inicial (estaçao 1), central (estaçao 4) e final (estaçao 7), assim novamente assemelhando-se a este estudo. Os autores encontraram evidências de melhoria na performance do sistema quando o gargalo esteve na posição central, porém quando o gargalo foi a primeira estação o nível de performance foi similar àquela quando o gargalo foi a última estação. Desse modo, ao deslocar-se o gargalo, a metodologia DBR deve ser continuamente ajustada para obter-se um desempenho estável, evitando tanto a perda de controle, levando ao congestionamento, quanto o controle muito justo, resultando em ociosidade prematura das estações. Assim, os autores concluíram que houve impacto no desempenho do sistema em função do controle das ordens de liberação. Além do mais, os autores assinalaram que se a posição do gargalo mudar em direção ao início, então o desempenho do sistema pode melhorar, uma vez que o tempo em que um controle mais justo pode ser exercido através da liberação de ordens aumenta. Contudo, o desempenho provavelmente diminuirá se a mudança do gargalo for em direção ao final do sistema.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo principal investigar se a aplicação de princípios da Teoria das Restrições traria benefícios a um sistema de produção. Através da metodologia de modelagem e simulação, partiu-se do cenário retratado no livro *A Meta*, de Goldratt, e aplicaram-se princípios da TOC a um sistema proposto por Côrrea (2007), originalmente arranjado por processos, porém adaptado a um sistema arranjado por produtos.

Na primeira etapa de experimentação realizada, ao serem simuladas três situações distintas, constatou-se que não houve diferença entre as situações I e II, logo, a variabilidade não interferiu no sistema. Entre as situações II e III, houve expressiva diferença quanto à variável WIP, e identificou-se que a redução da diferença de capacidade entre o gargalo e os demais recursos tende a ser positiva para o Total de Itens Produzidos. Assim, verificou-se que a situação modelada de acordo com o mecanismo tambor-pulmão-corda proposto pela TOC teve um melhor desempenho alcançando melhores resultados. Diante disso, inferiu-se que a aplicação de princípios da TOC apresentou benefícios ao sistema, assim como descrito no livro A Meta.

Na segunda etapa de experimentação, modificando-se as variáveis Posição do Gargalo e Tempo de Processamento do Gargalo, constatou-se que o melhor ajuste para o Total de Itens Produzidos é dado com o tempo de processamento do gargalo de 1,1 min independentemente da posição do gargalo. Já para a variável de resposta WIP, que idealmente deve ser o menor possível, os resultados obtidos não permitem concluir estatisticamente em relação aos fatores investigados, por falta de aderência dos dados à distribuição normal. Conclui-se que a aplicação de princípios da TOC ocasionou benefícios ao sistema de produção estudado.

Sugere-se que, para trabalhos futuros, continue-se explorando a aplicação da Teoria das Restrições a outros ambientes que não o seu tradicional (indústria com organização por processos). Entretanto, aconselha-se monitorar diferentes variáveis envolvidas em um sistema produtivo, por exemplo, tempos de *setup* e manutenção de recursos, a fim de identificar se os benefícios da aplicação da TOC continuam sendo perceptíveis. Além disso, dada a limitação de um único tipo de produto, propõe-se a análise a partir de um *mix* de produtos e produção por lotes, bem como sugere-se a aplicação de princípios da TOC a um ambiente real, a fim de averiguar se os resultados serão semelhantes e a TOC é igualmente benéfica.

7. REFERÊNCIAS

- BERTOLINI, M.; BEVILACQUA, M.; CIARAPICA, F.E.; GIACCHETTA, G. Business process re-engineering in healthcare management: a case study. **Business Process Management Journal**, v. 17, n. 1, p. 42-66, 2011.
- BETTERTON, C. E.; COX III, J. F. Espoused drum-buffer-rope flow control in serial lines: A comparative study of simulation models. **Int. J. Production Economics**, v. 117, p. 66-79, 2009.
- BEVILACQUA, M.; CIARAPICA, F. E.; CROSTA, A.; MAZZUTO, G.; PACIAROTTI, C. Designing an Efficient Production System: A Case Study of a Clothing Company. **International Journal of Engineering Business Management**, v. 5, p. 128-135, 2013.
- CANNON, J. N.; CANNON, H. M.; LOW, J. T. Modeling Tactical Product-Mix Decisions: A Theory-of-Constraints Approach. **Simulation & Gaming (S&G)**, v. 44, n. 5, p. 624-644, 2013.
- CHAKRAVORTY, S. S.; ATWATER, J. B. The impact of free goods on the performance of drum-buffer-rope scheduling systems. **Int. J. Production Economics**, v. 95, p. 347-357, 2005.
- CHOONG, K. K. Understanding the features of performance measurement system: a literature review. **Measuring Business Excellence**, v. 17, n. 4, p. 102-121, 2013.
- CHWIF, L. **Redução de modelos de simulação de eventos discretos na sua concepção: uma abordagem causal.** 1999. 139 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1999.
- CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. **Planejamento, Programação e Controle da Produção.** 5^a ed. São Paulo: Atlas, 2007. Cap. 9.
- COSTAS, J.; PONTE, B.; DE LA FUENTE, D.; PINO, R.; PUCHE, J.. Applying Goldratt's Theory of Constraints to reduce the Bullwhip Effect through agent-based modeling. **Expert Systems with Applications**, v. 42, p. 2049-2060, 2015.
- COX III, J. F.; ROBINSOSN, T. M.; MAXWEEL, W. Applying the Theory of constraints to solve your most vexing problems. **Family Practice Management**, v. 21, n. 5, p. 18-22, 2014.
- COX III, J. F. et al. **The Theory of Constraints International Certification Organization dictionary**, 2^a ed, 2012.
- DAVIES, J.; MABIN, V. J.; BALDERSTONE S. J. The theory of constraints: a methodology apart? - A comparison with selected OR/MS methodologies. **Omega the International Journal of Management Science**, v. 33, p. 506-524, 2005.
- GEORGIADIS, P.; POLITOU, A. Dynamic Drum-Bufer-Rope approach for production planning and control in capacitated flow-shop manufacturing systems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 65, p. 689-703, 2013.

- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 6^a ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GOLDRATT, E. M. Optimized production timetable: a revolutionary program for industry. In: **APICS 23rd Annual Conference Proceedings**, 1980.
- GOLDRATT, E. M. "Computerized shop floor scheduling". **International Journal of Production Research**, v. 26 n. 3, p. 443-55, 1988.
- GOLDRATT, E. M. **What is this thing called Theory of Constraints and how should it be implemented?** 1^a ed. Great Barrington: North River Press, 1990.
- GOLDRATT, E. M.; FOX, R. E. **A corrida pela vantagem competitiva.** São Paulo: Instituto de Movimentação e Armazenagem de Materiais, 1989.
- GOLDRATT, E. M.; COX, J. **A Meta: Um processo de melhoria contínua.** 2^a ed. São Paulo: Nobel, 2002.
- GOLDRATT, E. M. Standing on the shoulders of giants – production concepts versus production applications The Hitachi Tool Engineering example”, **Gestão & Produção**, v. 16, n. 3, p. 333-343, 2009.
- GOLMOHAMMADI, D.; MANSOURI, S. A. Complexity and Workload Considerations in Product Mix Decisions under the Theory of Constraints. **Naval Research Logistics**, v. 62, p. 357-369, 2015.
- GONZALEZ, P. L.; FRAMINAN, J. M.; RUIZ-USANO, R. A multi-objective comparison of dispatching rules in a drum–buffer–rope production control system. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 23, n. 2, p. 155-167, 2010.
- GRASAS, A.; JUAN, A. A.; RAMALHINHO, H. **Operations Research And Simulation In Master's Degrees: A Case Study Regarding Different Universities In Spain.** Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference. p. 3609 – 3619, 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez47.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?arnumber=6721722>>. Acesso em: 9 abr. 2017.
- GUPTA, M. C.; BOYD, L. H. Theory of constraints: a theory for operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 28, n. 10, p. 991 – 1012, 2008.
- HARRELL, C.; GHOSH, B.; BOWDEN, R. O. **Simulation Using ProModel.** 3^a ed. New York: Mac GrawHill, 2012.
- IZMAILOV, A. If your company is considering the Theory Of Constraints. **Procedia Social and Behavioral Sciences**, v. 150, p. 925-929, 2014.
- KELTON, W. David; SMITH, Jeffrey S.; SURROCK, David T. **Simio and Simulation: Modeling, Analysis, Applications.** 3^a ed. Sewickley: Simio LLC, 2014.

LAW, A. M. How to conduct a successful simulation study. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. p. 66 – 70, 2003. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez47.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1261409>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis.** 2^a ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

LEMESSI, M.; REHBEIN, S.; REHN, G.; SCHULZE, T. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference. p. 1-12, 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org.ez47.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6465048>>. Acesso em: 9 abr. 2017.

LIBRELATO, T. P.; LACERDA, D. P.; RODRIGUES, L. H.; VEIT, D. R. A process improvement approach based on the Value Stream Mapping and the Theory of Constraints Thinking Process. **Business Process Management Journal**, v. 20, n. 6, p. 922- 949. 2013.

MARTINS, R. A. Abordagens Quantitativa e Qualitativa. In: MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações.** 2^a ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012. Cap. 3.

NEMBHARD, D. A.; PRICHANONT, K. Cross Training in Serial Production With Process Characteristics and Operational Factors. **IEEE Transactions On Engineering Management**, v. 54, n. 3, 2007.

NETO, R. M.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. In: MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações.** 2^a ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012. Cap. 8.

PACHECO, D. A. J.; LACERDA, D. P.; CORCINI NETO, S. L. H.; JUNG, C. F.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. Balanceamento de fluxo ou balanceamento de capacidade? Análises e proposições sistêmicas. **Gestão e Produção**, v.21, n.2, p.355-367, 2014.

QIAO, F.; WU, Q. Layered Drum-Buffer-Rope-Based Scheduling of Reentrant Manufacturing Systems. **IEEE Transactions On Semiconductor Manufacturing**, v. 26, n. 2, 2013.

RAHMAN, S. Theory of constraints: A review of the philosophy and its applications. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 18, n. 4, p. 336 – 355, 1998.

RICKETTS, J. A. **Reaching the Goal: How Managers Improve a Services Business Using Goldratt's Theory of Constraints.** 1^a ed. Westford: IBM Press: 2007.

SANTOS, A. R. **Metodologia científica: a construção do conhecimento.** 7^a ed. Rio de Janeiro: Lamparina, 2007.

ŞİMŞİT, Z. T.; GÜNEY, N. S.; VAYVAY, Ö. Theory of Constraints: A Literature Review. **Procedia Social and Behavioral Sciences**, v. 150, p. 930-936, 2014.

SOUZA, F. B. Do OPT à Teoria das Restrições: avanços e mitos. **Revista produção**, v. 15, n. 2, p. 184-197, 2005.

SOUZA, F. B.; PIRES, S. R. I. Produzindo para disponibilidade: uma aplicação da Teoria das Restrições em ambientes de produção para estoque. **Gestão e Produção**, v. 21, n. 1, p. 65-76, 2014.

THÜRER, M.; QU, T.; STEVENSON, M.; LI, C. D.; HUANG, G. Q. Deconstructing bottleneck shiftiness: the impact of bottleneck position on order release control in pure flow shops. **Production Planning & Control**, v. 28, n. 15, p. 1223-1235, 2017.

TULASI, C. H. L.; RAO, A. R. Review on Theory of Constraints. **International Journal of Advances in Engineering & Technology**, v. 3, n. 1, p. 334-344, 2012.

WAHLERS, J. L.; COX III, J. F. Competitive factors and performance measurement: Applying the theory of constraints to meet customer needs. **International Journal of Production Economics**, v. 37, p. 229-240, 1994.

WALKER II, E. D.; COX III, James F. Addressing ill-structured problems using Goldratt's thinking processes: A white collar example. **Management Decision**, v. 44, n. 1, p. 137-154, 2006.

WATSON, K. J.; BLACKSTONE, J. H.; GARDINER, S. C. The evolution of a management philosophy: The theory of constraints. **Journal of Operations Management**. v. 25, p. 387–402, 2007.

APÊNDICE A - SISTEMATIZAÇÃO DE EVENTOS NARRADOS NO LIVRO “A META”

EVENTO	CONTEXTO	CAUSA	AÇÃO TOMADA	RESULTADO
Atraso no Pedido 41.427 (p. 10)	Quase todas as peças estão prontas e esperando, mas não podem ser montadas (p. 10); muitos outros pedidos estão atrasados (p. 13)	Falta uma peça ser processada em outra operação; as peças estão aguardando processamento ao lado de uma máquina CNC; operadores estão preparando a máquina para outro trabalho que não as peças do pedido (p. 10)	Interromper preparação atual e preparar máquina para processar peças do pedido 41.427 (p. 10)	Uma preparação é desperdiçada (p. 11); preparação foi malfeita e a máquina desmantelou-se; peças serão refugadas (p. 17); pagamento de horas extra ao pessoal da montagem (p. 23); pessoas deixaram de trabalhar nos outros departamentos para trabalhar no pedido (p. 23-24); pedido 41.427 é expedido tarde da noite (p. 24)
Máquina NCX-10 está parada (p. 17)	A máquina é a única do tipo (p. 18)	Má preparação (p. 17)	Contatar fabricante para manutenção (p. 18)	Peças serão refugadas (p. 17);
Horistas estão sem o que fazer (p. 51)	Haviam cumprido suas metas e estava esperando peças (p. 51)	Atraso do lote	Achar trabalho para mantê-los ocupados (p. 51)	Horistas deslocam material de um lado do corredor para outro para manterem-se ocupados (p. 51)
Robôs instalados (p. 77)	Modernizar a fábrica para aumentar eficiência (p. 76)	Atrasos na produção (p. 27-28; 77)	Mais material foi liberado para alimentar os robôs (p. 78;80)	Vendas não melhoraram; pedidos atrasados aumentaram (p. 77); estoque de peças aumentou (p. 78); peças não estão sendo consumidas (por não haver pedidos que necessitem delas e/ou por não conseguir produzir peças não-gargalo para montar produtos e expedir pedidos); peças não são obtidas no momento em que são necessárias (p. 79); produzir por previsão futura para manter a todos ocupados e aumentar a eficiência (p. 80); custos para manter inventário aumentaram (p. 80)
Sub montagens atrasadas (p. 135)	Necessidade de todas as sub montagens prontas para não fazer duas preparações na montagem final (p. 135); 100 peças devem ser produzidas e montadas até às 17h (em 5 horas) ou nada é expedido (p. 139)	Pessoal do departamento envolvido está em almoço e só vai iniciar peças às 12h (p. 139)	Peças devem ser processadas em um departamento e em seguida soldadas; um robô será preparado para soldar (p. 138); peças serão transportadas do departamento até o robô a cada hora e não apenas uma vez ao dia; robô será preparado para trabalhar 25 peças/hora (p. 139); é feita a programação	Robô só pode começar o trabalho às 13h (p. 140); pessoal do departamento cumpriu o processamento de 100 peças, mas não conforme programação de 25 peças/hora; nas primeiras horas produziu-se menos e nas últimas horas mais (p. 142-143); às 17h05min o robô ainda está soldando as peças pois dependia da produção do departamento

			departamento/robô (p. 140)	anterior (p. 144-145)
EVENTO	CONTEXTO	CAUSA	AÇÃO TOMADA	RESULTADO
Cenário aplicação TOC: gargalo tem semanas de pedidos em atraso; a máquina é nova e supostamente uma das mais eficientes; é a única do tipo; capaz de fazer operações que 3 máquinas antigas faziam (p. 155); 80% dos produtos passam pelo gargalo (p. 174); 67 pedidos em atraso; 90% dos pedidos em atraso tem peças que passam por 1 ou 2 gargalos e 85% desses estão presos na montagem esperando peças do gargalo (p. 182); após mudanças, recorde de entrega de pedidos e redução líquida de 12% no estoque em processo (p. 206); possibilidade de prever quando um pedido será expedido; níveis de inventário diminuem; peças chegam aos gargalos quando devem; imediatamente eficiências diminuíram mas voltaram a aumentar; não há mais pedidos atrasados; ganho aumentou (p. 231;248); centros de trabalho ficam ociosos esperando o centro de trabalho anterior terminar o lote; não-gargalos se transformam em gargalo temporário (p. 248)				
Identificação do gargalo (p. 150; 151) *	Problema sistêmico de atrasos em pedidos e falta de capacidade (p. 27-28)	Modelo de gerenciamento adotado; cálculo da demanda dos recursos da fábrica e comparação com a demanda do mercado; cálculo de horas necessárias de contribuição por centro (p. 152); identificação de roteiros de produção que listavam máquinas já inexistentes (p. 152); identificação de listas de materiais que não correspondem aos roteiros do produto; roteiros de produção com tempos de processamento desatualizados (p. 153);		Identificação da máquina NCX-10 como gargalo com pilhas de estoque ao lado (p. 155)
Identificação de um 2º gargalo no departamento de tratamento térmico (p. 157)	Os fornos são operados com metade da capacidade para atender pedidos específicos (p. 157)	Agilizadores demandam tratamento de poucas unidades por vez apenas para montar um pedido e expedi-lo (p. 157)		Muitas peças devem esperar em detrimento do tratamento de poucas (p. 157); lotes são muito pequenos ou então muito grandes e é necessário segundo tratamento térmico para finalizar (p. 158);
Otimização do gargalo através de reorganização da capacidade do gargalo (p. 159) *	Aumentar capacidade da fábrica pelo aumento da capacidade do gargalo (p. 162);		Fazer gargalos trabalharem apenas no que vai contribuir com o ganho (p. 171)	Recuperar máquinas antigas para aumentar a produção do gargalo (p. 164-165); buscar fornecedores para terceirizar tratamento térmico (p. 166;201;202)
Gargalo está parado (p. 163)	Pós otimização do gargalo	Descanso do pessoal (p. 163)	Ajustar pausas sem perder tempo do gargalo (p. 164); conversar com sindicato para obter mais flexibilidade (p. 175;184)	Novo sistema de horários de intervalo para não interromper gargalo (p. 190)
Peças refugadas (p. 168)	Pós otimização do gargalo	Controle de qualidade está após o gargalo e tempo do gargalo é perdido (p. 168)	Colocar controle de qualidade antes do gargalo (p. 168; 174)	Descoberta de que 5% das peças que iam para o gargalo 1 e 7% das que iam para o gargalo 2 não passavam nos testes de qualidade (p. 191)
Classificação de prioridade de pedidos (p. 175)	Pedidos são expedidos de acordo com “quem grita mais alto” (p. 175)	Atrasos na produção	Identificar pedidos em atraso e parte do inventário necessário que deve passar pelo gargalo; ordenar pedidos de acordo com tempo de atraso (p. 175); programar gargalos para trabalhar nos pedidos mais atrasados conforme prioridade (p. 175-176); trabalhar apenas no que está na lista (p. 183)	Lista de pedidos em atraso ordenados por data de entrega; verificação lista de material de cada pedido para descobrir quais peças eram feitas pelo gargalo; verificação se havia estoque para fazer peças; lista para os gargalos de quais peças cada um deve produzir e em que ordem (p. 182); identificação de necessidade de regra de prioridade
Gargalo está	Foram feitos 2 lotes de peças	Peças do gargalo ficaram retidas na seção de	Preparar máquina para processar	Certificar-se que pessoal dos gargalos sabe

parado mesmo após mudanças (p. 185)	mas para o 3º não encontrou-se o material em meio às pilhas (p. 185)	tornos, um recurso não-gargalo, que estava processando peças não-gargalo; operador iniciou a processar um lote que não tinha pressa pois não havia sido comunicado sobre sistema de prioridades e queria manter-se ocupado (p. 186)	próximo item de lista para o qual haja material (p. 185)	que deve trabalhar no pedido prioritário da lista e criar sistema de comunicação de prioridades (p. 187)
Criação de sistema de prioridades (p. 188-189) *	Comunicar a todos da fábrica sobre o que devem trabalhar (p. 189)	Atrasos na produção	Atribuição de etiquetas a todo o estoque em processo; etiqueta vermelha para trabalho com maior prioridade a ser feito “imediatamente”; etiqueta verde para outras peças; em caso de lotes com a mesma cor, seguir etiqueta com número mais baixo, ou seja, menos tempo para serem processadas (p.189)	Gargalos começam a receber suas peças prontamente; pilhas de estoque na frente dos gargalos aumentam; peças com etiqueta vermelha chegam mais rápido à montagem final (p. 191)
Melhoria do sistema de prioridades (p. 192-193)	Pós otimização do gargalo	Identificar peças que precisam de atenção especial; diferenciar peças muito parecidas que passam e que não passam pelos gargalos (p. 192)	Adição de fita amarela a peças que passam pelos gargalos (p. 193)	
Recuperação de 3 máquinas antigas em desuso (p. 194) *	Máquinas não são automatizadas, mas podem aumentar a capacidade da fábrica/gargalo (p. 195); capacidade pode ser aumentada em 18% (p. 201)	Complementar trabalho do gargalo		
Registro de atividades do gargalo 2 (p. 197)		Dados atuais são muito imprecisos (p. 198)	Mensurar gargalo 2 e também gargalo 1 (p. 199)	Alocação de pessoal permanentemente ao lado do gargalo 2 (p. 200;202)
Gargalo 1 ainda fica ocioso (p. 200)	Pós otimização do gargalo	Pessoal da preparação está ocupado com outras máquinas não-gargalos; problema não relacionado com intervalos (p. 200)	Designar operador e ajudante para ficar permanentemente ao lado do gargalo (p. 200;202)	
Aumento em 10% da produção do gargalo 2 (p.203) *		Preparação de peças para carregar os fornos antecipadamente; agrupamento de peças tratadas à mesma temperatura (p. 203)	Mudança para que as mesas se tornem intercambiáveis a fim de preparar carga de peças com antecedência e trocar cargas usando uma empilhadeira (p. 204)	Possibilidade de fazer uma carga a mais de peças por semana (p.204)
Revisão engenharia das peças (p. 205) *		Uso do gargalo 2 sem necessidade (p. 205)	Reducir em torno de 20% a carga atual do gargalo 2 (p. 205)	Gargalo 2 deixa de existir
Surgimento novo gargalo	Pouco suprimento das peças dos gargalos e falta de peças	Demandas dos centros de trabalho não gargalos aumentou (p. 211)	Descobrir quais são as peças, quantas são, que produtos são afetados e o	

(fresadoras) (p. 210;214)	de não-gargalos (p. 210); peças com etiquetas verdes atrasadas (p. 210-211); peças não estão chegando à montagem final (p. 213)		roteiro de produção (p. 211)	
Quantidade de inventário com etiqueta verde está aumentando nas fresadoras (p. 214)	Peças retidas estão faltando na montagem final; 75%-80% do trabalho segue para o gargalo 2 (p. 214)	Sistema de prioridades (p. 212); foco apenas no material com etiqueta vermelha (p. 214); liberação de material mais rapidamente do que os gargalos conseguem processar (p. 222)	Segurar materiais para as peças vermelhas e liberá-los de acordo com as necessidades dos gargalos; gargalos (tambor) dirão quando liberar mais material (corda) (p. 226); prever tempo que material demora para chegar aos gargalos depois de ser liberado no processo (pulmão) (p. 227)	Determinar programa de liberação de materiais com etiquetas vermelhas e programa de montagem final, gargalos definem liberação de todos os materiais na fábrica pelos gargalos (p. 228);

Cenário após TOC: Número de pedidos aumentou, eficiências continuam aumentando, peças estão prontas para seguir para o próximo centro de trabalho antes (p. 248); há menos tempo ocioso, inventários estão mais baixos, único estoque em processo na produção corresponde ao da demanda corrente (p. 249); aumento em 17% dos resultados (p. 257); inventários representam cerca de 40% da situação inicial, ganho dobrou (p. 258); previsão de ultrapassar lucro líquido em 20% (p. 281)

EVENTO	CONTEXTO	CAUSA	AÇÃO TOMADA	RESULTADO
Corte pela metade do tamanho dos lotes dos não-gargalos (p. 240) *	Aumentar em 15% os resultados (p. 233)		Contatar fornecedores para aumentar frequência das entregas e reduzir quantidades (p. 241); aumentar número de preparações (p.243-244)	Diminuição estoque em processo na fábrica e dinheiro preso no sistema (p. 240-241); redução do tempo para processar um lote, velocidade do fluxo de peças aumenta (p. 243); prometer entregas mais rápidas aos clientes (p. 244;246); eficiências continuam boas e força de trabalho mantém-se mais ocupada do que antes (p. 248); trabalho flui mais facilmente; pessoas ficam menos tempo sem o que fazer (p. 249); custo das peças aumenta em função das preparações adicionais mas sem afetar as despesas reais (p. 250)
Redução novamente à metade do tamanho dos lotes (p. 254)			Reprogramar alguns pedidos no sistema de prioridades para serem expedidos apenas nas datas prometidas e não antes (p. 255); contratar fornecedor para entregas parceladas em semanas (p. 255-256)	Entrega parcelada de produtos em semanas (p. 256)
Eliminação etiquetas de prioridade (p. 317)			Trabalhar na mesma sequência que as peças chegam (p. 317)	Menos buracos nos pulmões (p. 317); identificação de capacidade extra (p. 320)
Pedidos atrasados (p. 333)	Gargalos não estão sobrecarregados; gargalos “mudam de lugar” (p. 335)	Há momentos em que os não-gargalos têm de ter mais capacidade do que os gargalos para repor inventário antes do gargalo (p. 338); novos pedidos mudam o equilíbrio do sistema (p. 339); proteção insuficiente para os	Repor inventário antes do gargalo e antes da montagem; trabalhar horas extras para recuperar atraso (p. 339)	Aumento temporário despesas operacionais e queda no ganho (p. 340)

		gargalos existentes (p. 344)	
Cenário futuro: O gargalo sai da fábrica. Administrar RRCs em conjunto com marketing (p. 290); introduzir processo de melhoria contínua (p. 307;312-313); aumentar pedidos (p. 322); mudar forma de avaliar inventário (p. 342); esforços sincronizados entre os elos (p. 345); substituir contabilidade de custos (p. 349)			

* Eventos relacionados ao gerenciamento por gargalos descritos por Cox III et al (2012).

APÊNDICE B – SITUAÇÕES PARA SIMULAÇÃO

Situação I - Determinístico		
Recurso	Tempo de processamento (min/un)	% ativação do recurso
Y1	1	100
Y2	1	100
X_RRC	2	100
Y3	1	100
Y4	1	100
Y5	1	100
Y6	1	100
Y7	1	100

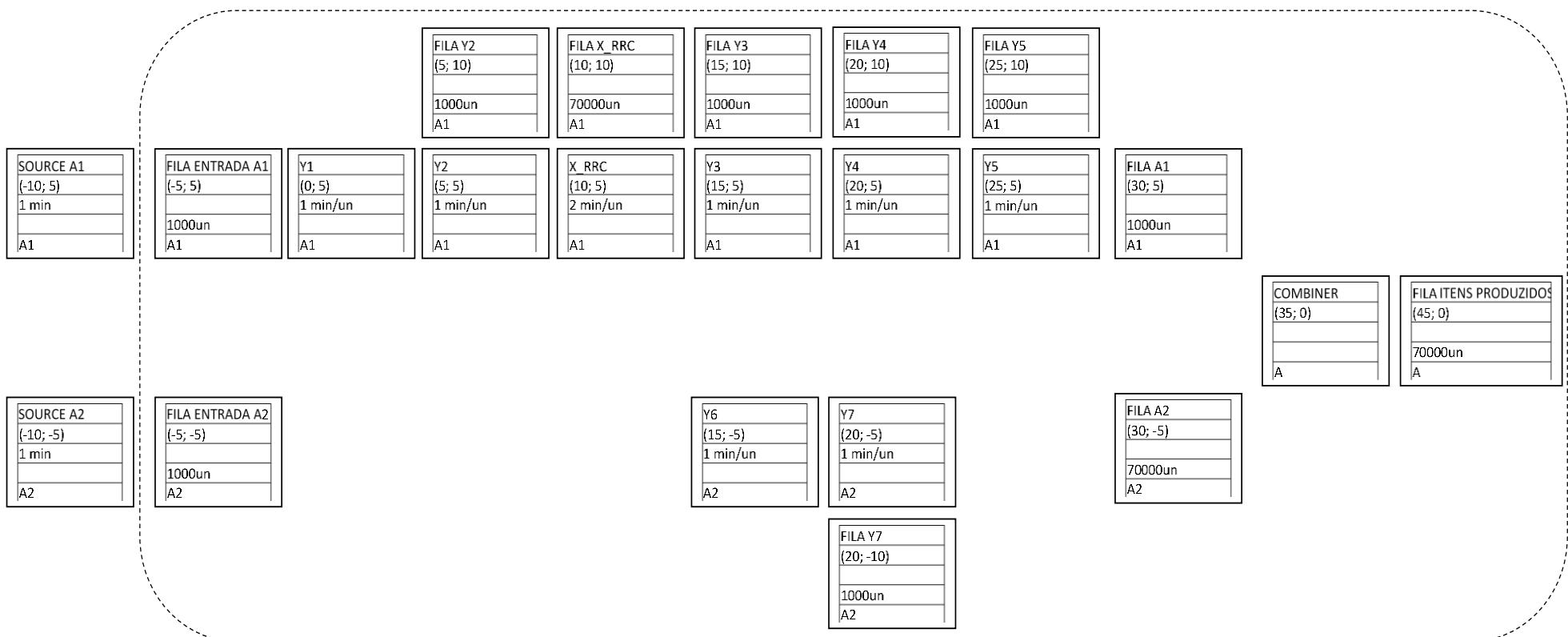
Situação II - Probabilístico		
Recurso	Tempo de processamento (min/un)	% ativação do recurso
Y1	N(1; 0,2)	100
Y2	N(1; 0,2)	100
X_RRC	N(2; 0,4)	100
Y3	N(1; 0,2)	100
Y4	N(1; 0,2)	100
Y5	N(1; 0,2)	100
Y6	N(1; 0,2)	100
Y7	N(1; 0,2)	100

Situação III – Probabilístico + programação DBR			
Recurso	Tempo de processamento (min/un) não otimizado	Tempo de processamento (min/un) otimizado em 25%	Tempo de processamento (min/un) otimizado em 45%
Y1	N(1; 0,2)	N(1; 0,2)	N(1; 0,2)
Y2	N(1; 0,2)	N(1; 0,2)	N(1; 0,2)
X_RRC	N(2; 0,4)	N(1,5; 0,3)	N(1,1; 0,22)
Y3	N(1; 0,2)	N(1; 0,2)	N(1; 0,2)
Y4	N(1; 0,2)	N(1; 0,2)	N(1; 0,2)
Y5	N(1; 0,2)	N(1; 0,2)	N(1; 0,2)
Y6	N(1; 0,2)	N(1; 0,2)	N(1; 0,2)
Y7	N(1; 0,2)	N(1; 0,2)	N(1; 0,2)

APÊNDICE C – COMPONENTES DO MODELO COMPUTACIONAL - SITUAÇÃO I

Legenda:

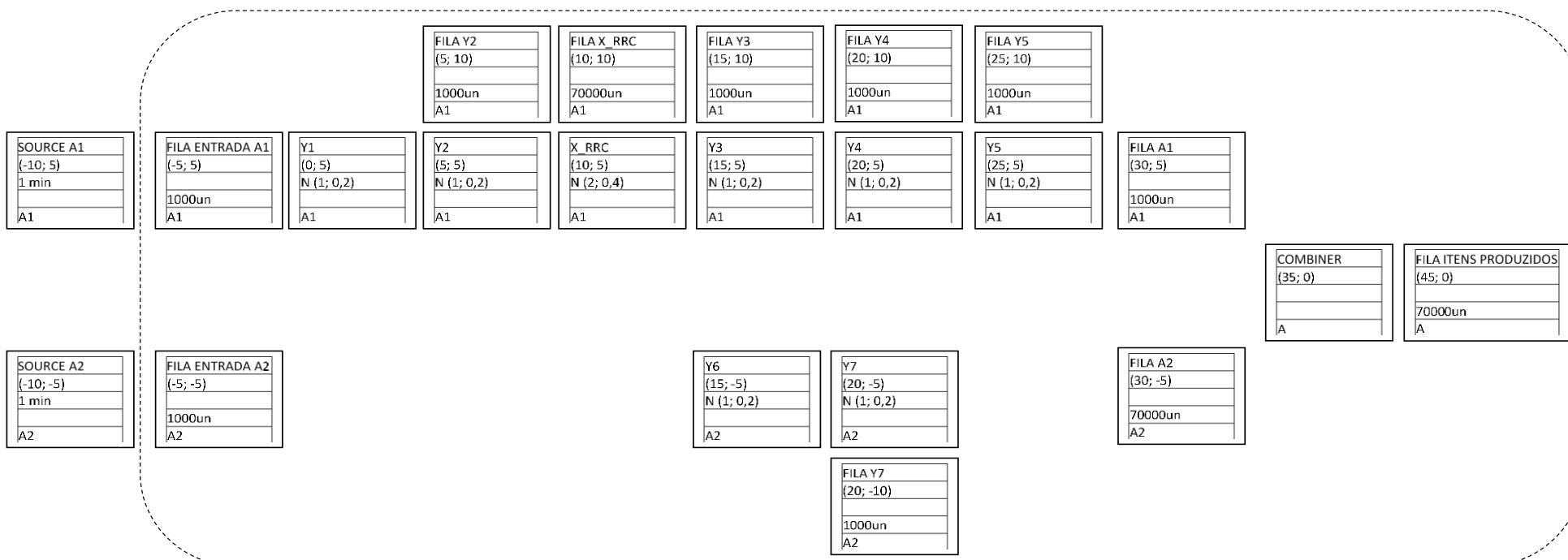
Componente
Coordenadas (x; y)
Tempo de processamento (min/un)
Capacidade
Entidade



APÊNDICE D – COMPONENTES DO MODELO COMPUTACIONAL - SITUAÇÃO II

Legenda:

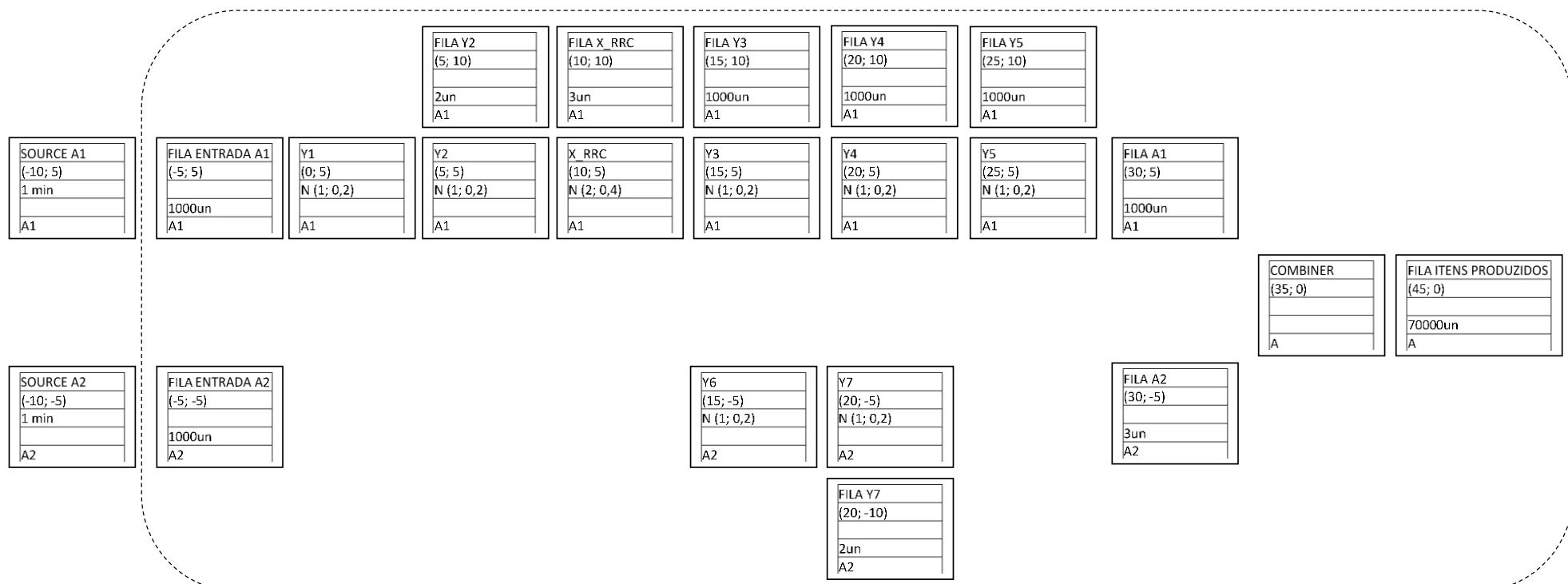
Componente
Coordenadas (x; y)
Tempo de processamento (min/un)
Capacidade
Entidade



APÊNDICE E – COMPONENTES DO MODELO COMPUTACIONAL - SITUAÇÃO III

Legenda:

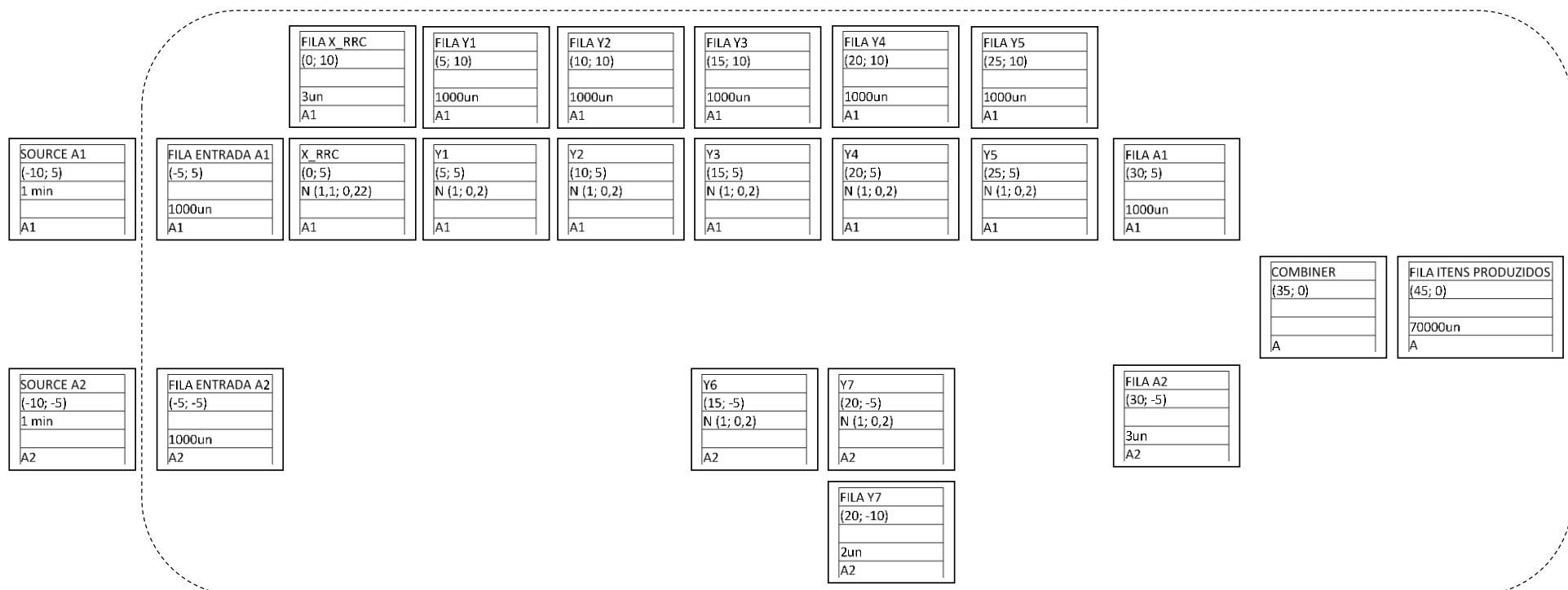
Componente
Coordenadas (x; y)
Tempo de processamento (min/un)
Capacidade
Entidade



APÊNDICE F – COMPONENTES DO MODELO COMPUTACIONAL – CENÁRIO 1

Legenda:

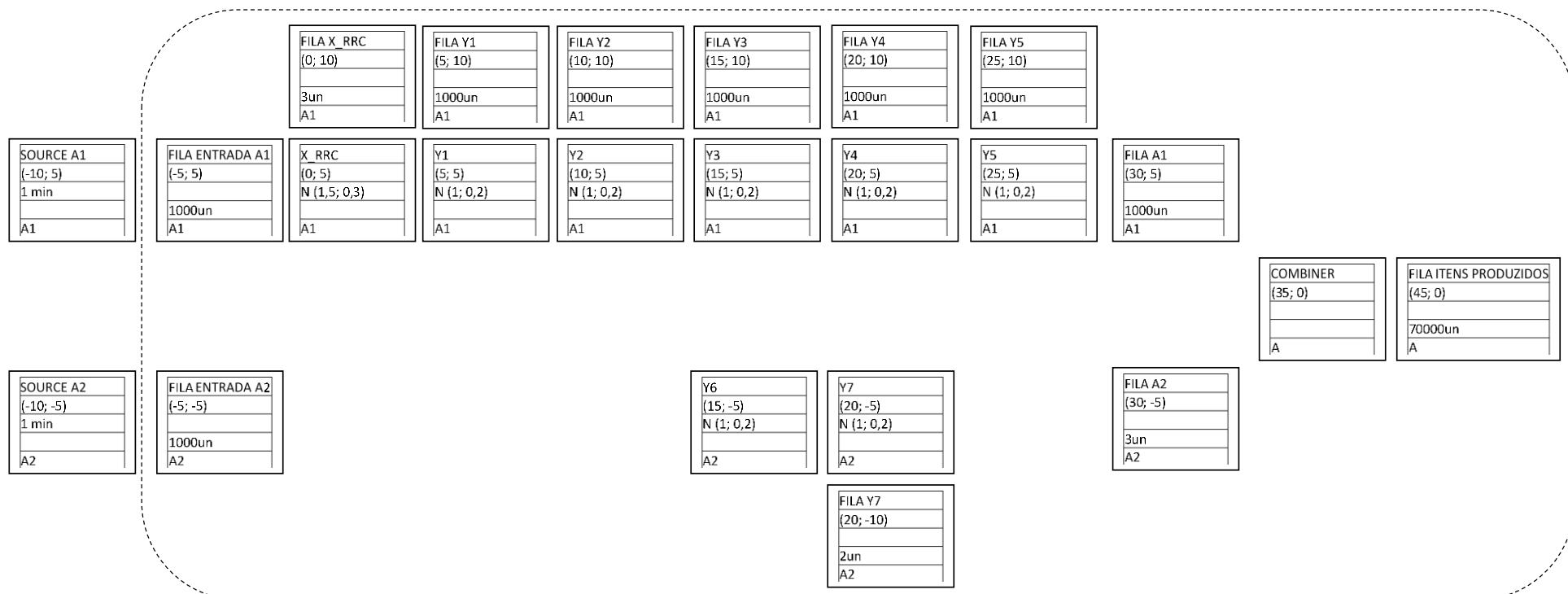
Componente
Coordenadas (x; y)
Tempo de processamento (min/un)
Capacidade
Entidade



APÊNDICE G – COMPONENTES DO MODELO COMPUTACIONAL – CENÁRIO 2

Legenda:

Componente
Coordenadas (x; y)
Tempo de processamento (min/un)
Capacidade
Entidade



APÊNDICE H – COMPONENTES DO MODELO COMPUTACIONAL – CENÁRIO 3

Legenda:

Componente
Coordenadas (x; y)
Tempo de processamento (min/un)
Capacidade

SOURCE A1
(-10; 5)
1 min

FILA ENTRADA A1
(-5; 5)
1000un

FILA X_RRC
(0; 10)

FILA Y1
(5; 10)

FILA Y2
(10; 10)

FILA Y3
(15; 10)

FILA Y4
(20; 10)

FILA Y5
(25; 10)

FILA A1
(30; 5)

SOURCE A2
(-10; -5)
1 min

FILA ENTRADA A2
(-5; -5)
1000un

Y6
(15; -5)

Y7
(20; -5)

FILA A2
(30; -5)

FILA Y7
(20; -10)

COMBINER
(35; 0)

FILA ITENS PRODUZIDOS
(45; 0)

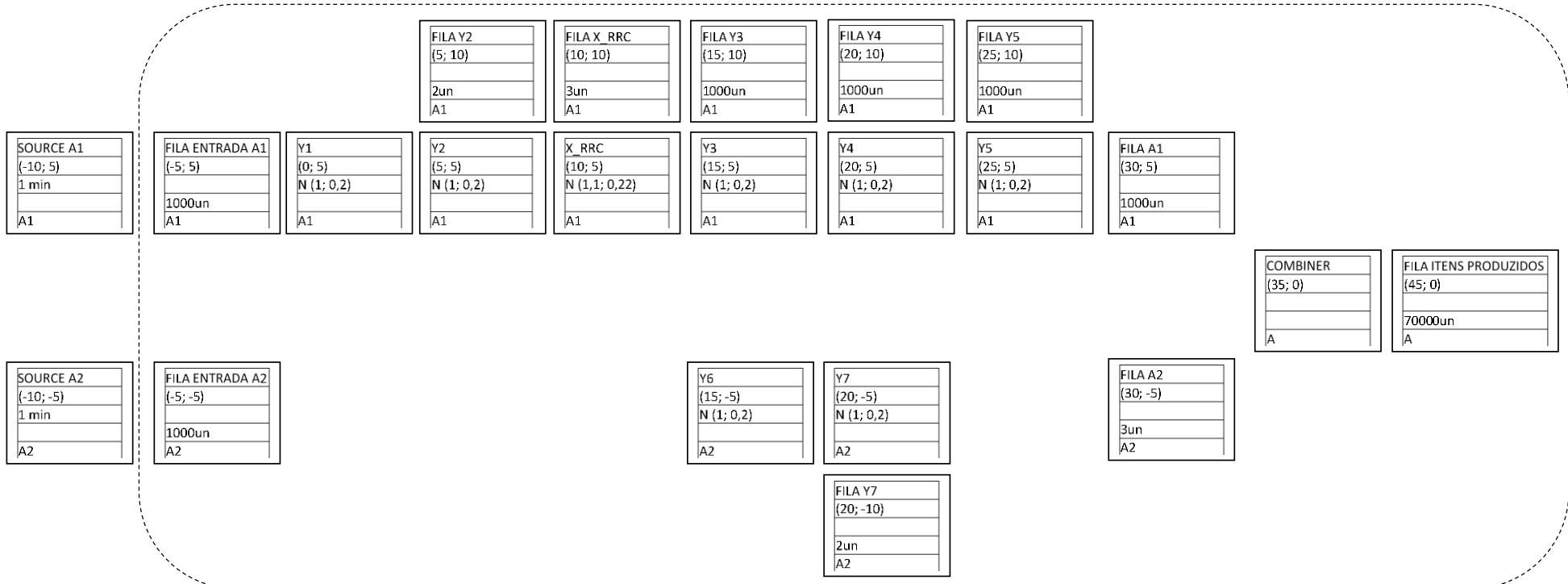
70000un

A

APÊNDICE I – COMPONENTES DO MODELO COMPUTACIONAL – CENÁRIO 4

Legenda:

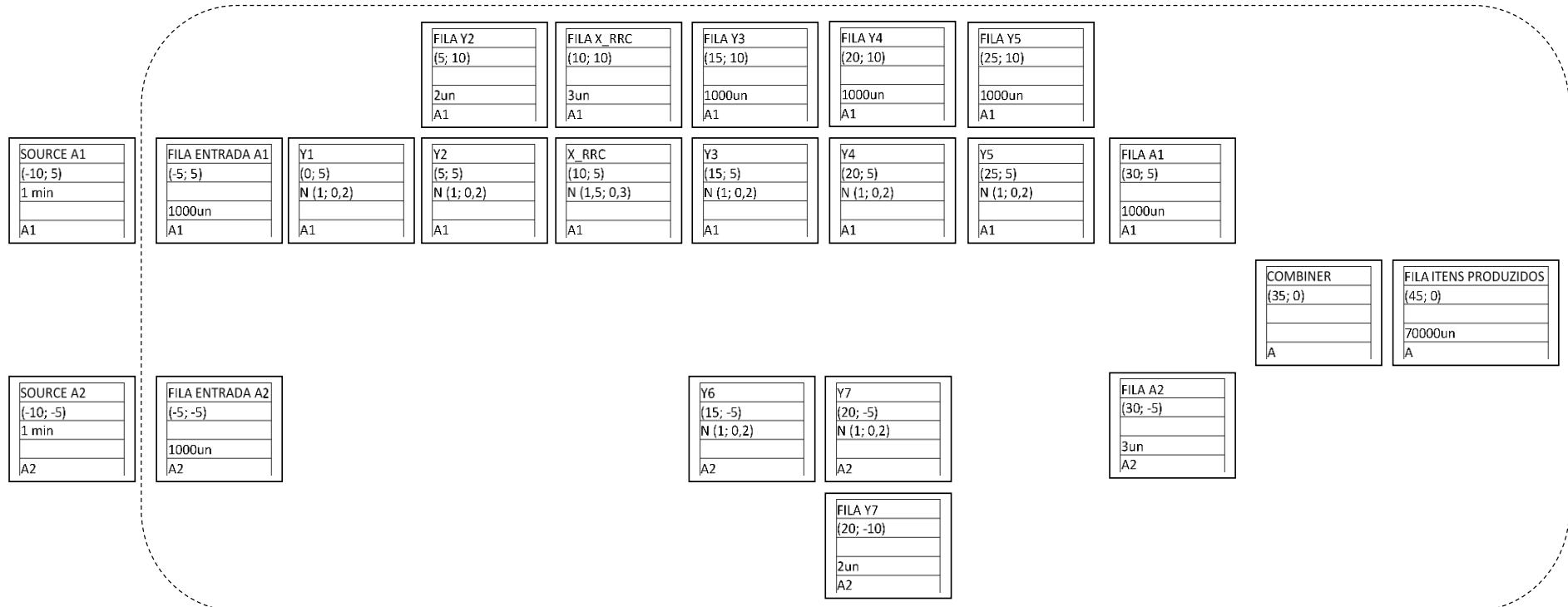
Componente
Coordenadas (x; y)
Tempo de processamento (min/un)
Capacidade
Entidade



APÊNDICE J – COMPONENTES DO MODELO COMPUTACIONAL – CENÁRIO 5

Legenda:

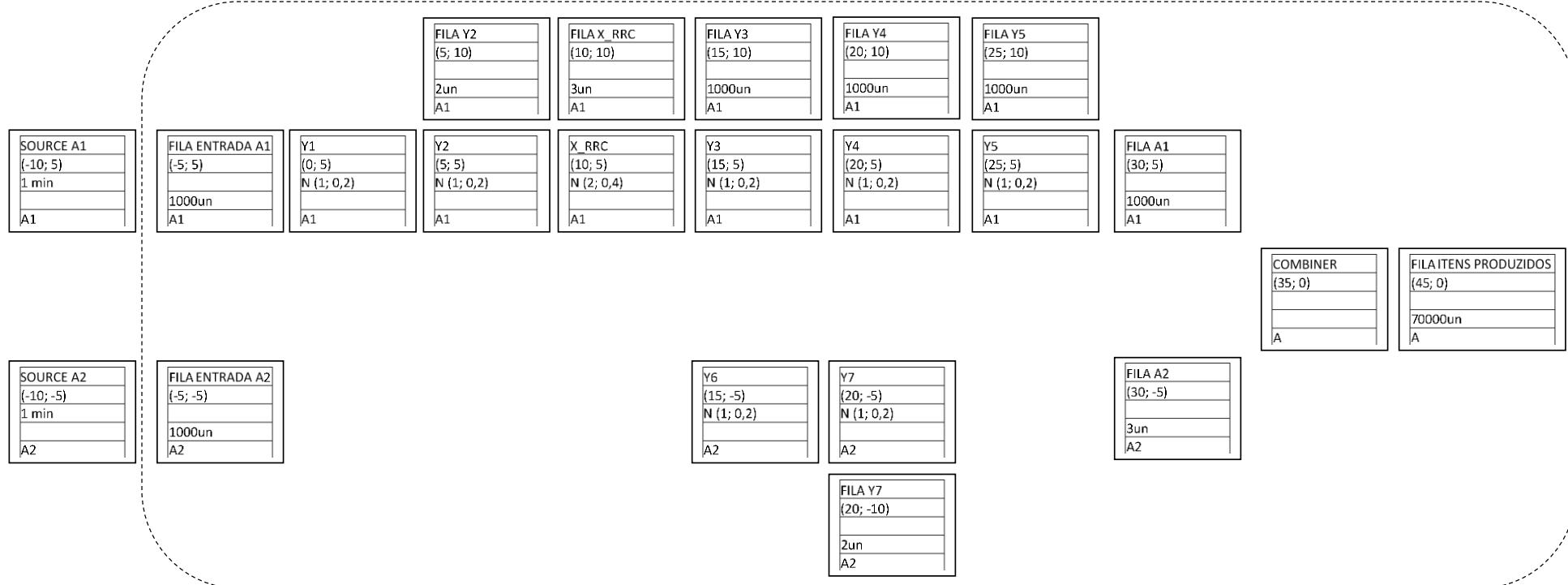
Componente
Coordenadas (x; y)
Tempo de processamento (min/un)
Capacidade
Entidade



APÊNDICE K – COMPONENTES DO MODELO COMPUTACIONAL – CENÁRIO 6

Legenda:

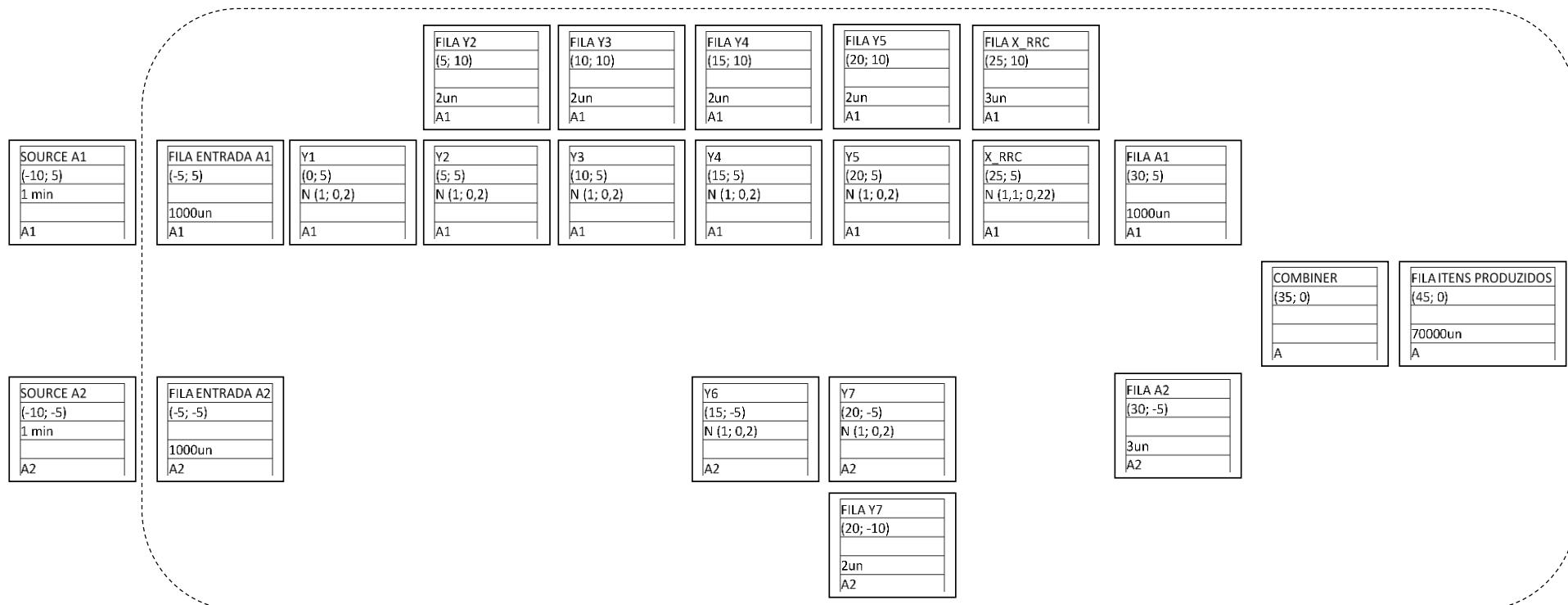
Componente
Coordenadas (x; y)
Tempo de processamento (min/un)
Capacidade
Entidade



APÊNDICE L – COMPONENTES DO MODELO COMPUTACIONAL – CENÁRIO 7

Legenda:

Componente
Coordenadas (x; y)
Tempo de processamento (min/un)
Capacidade
Entidade

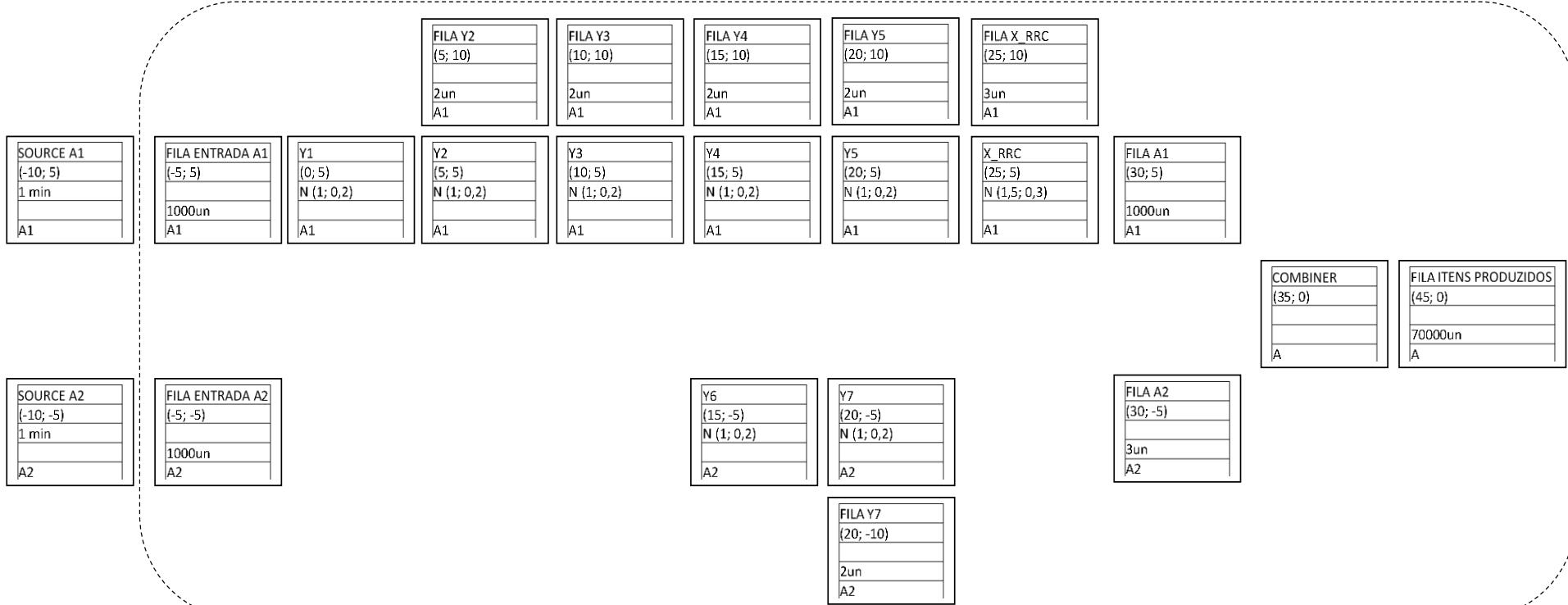


APÊNDICE M – COMPONENTES DO MODELO COMPUTACIONAL – CENÁRIO 8

Legenda:

Componente
Coordenadas (x; y)
Tempo de processamento (min/un)
Capacidade

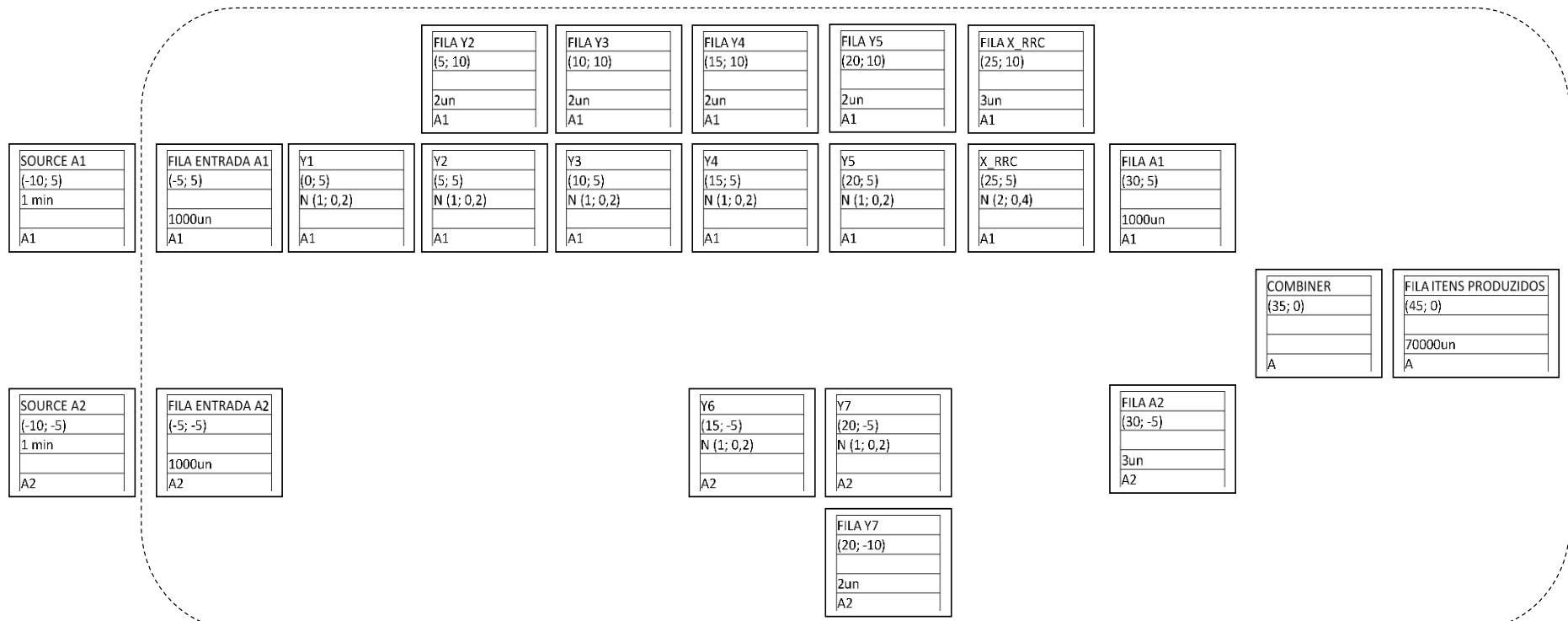
Entidade



APÊNDICE N – COMPONENTES DO MODELO COMPUTACIONAL – CENÁRIO 9

Legenda:

Componente
Coordenadas (x; y)
Tempo de processamento (min/un)
Capacidade
Entidade



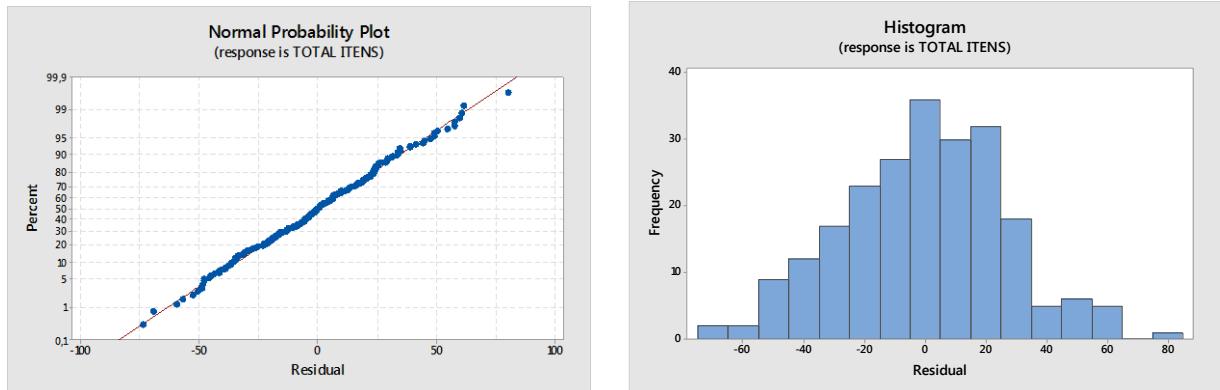
APÊNDICE O – RESULTADOS ABSOLUTOS DAS SIMULAÇÕES - CENÁRIOS 1 A 9

Arquivo	Replicação	Posição do gargalo	Tempo de processamento do gargalo	WIP fila Y1	WIP fila Y2	WIP fila Y3	WIP fila Y4	WIP fila Y5	WIP fila Y7	WIP fila A1	WIP fila A2	WIP fila X_RRC	WIP TOTAL	TOTAL ITENS	Utilização X_RRC
Cenário 1 TOC	1	Inicial	1,1	0,27	0,27	0,29	0,28	0,28	1,75	0,00	2,72	3,00	8,86	26201,00	100,00
	2			0,26	0,29	0,29	0,28	0,29	1,75	0,00	2,71	3,00	8,87	26156,00	100,00
	3			0,26	0,27	0,26	0,27	0,27	1,75	0,00	2,73	3,00	8,81	26160,00	100,00
	4			0,26	0,28	0,31	0,29	0,29	1,74	0,00	2,71	3,00	8,88	26198,00	100,00
	5			0,27	0,31	0,29	0,30	0,28	1,75	0,00	2,70	3,00	8,90	26194,00	100,00
	6			0,26	0,26	0,27	0,28	0,28	1,76	0,00	2,71	3,00	8,82	26170,00	100,00
	7			0,26	0,28	0,28	0,28	0,28	1,76	0,00	2,71	3,00	8,85	26163,00	100,00
	8			0,27	0,29	0,29	0,28	0,29	1,74	0,00	2,72	3,00	8,88	26197,00	100,00
	9			0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	1,73	0,00	2,72	3,00	8,87	26224,00	100,00
	10			0,26	0,29	0,28	0,28	0,29	1,74	0,00	2,71	3,00	8,85	26152,00	100,00
	11			0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	1,75	0,00	2,71	3,00	8,88	26180,00	100,00
	12			0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	1,75	0,00	2,71	3,00	8,90	26221,00	100,00
	13			0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	1,76	0,00	2,71	3,00	8,83	26176,00	100,00
	14			0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	1,74	0,00	2,69	3,00	8,85	26259,00	99,99
	15			0,26	0,27	0,29	0,27	0,29	1,74	0,00	2,71	3,00	8,83	26184,00	100,00
	16			0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	1,75	0,00	2,72	3,00	8,80	26124,00	100,00
	17			0,27	0,31	0,28	0,30	0,29	1,74	0,00	2,71	3,00	8,90	26239,00	100,00
	18			0,27	0,27	0,28	0,27	0,29	1,76	0,00	2,71	3,00	8,85	26214,00	100,00
	19			0,27	0,29	0,30	0,29	0,28	1,75	0,00	2,71	3,00	8,89	26205,00	100,00
	20			0,28	0,27	0,28	0,28	0,28	1,76	0,00	2,73	3,00	8,88	26161,00	100,00
	21			0,28	0,28	0,29	0,30	0,29	1,74	0,00	2,70	3,00	8,88	26231,00	100,00
	22			0,27	0,30	0,29	0,28	0,31	1,74	0,00	2,70	3,00	8,89	26258,00	100,00
	23			0,29	0,29	0,29	0,31	0,29	1,75	0,00	2,71	3,00	8,93	26218,00	100,00
	24			0,26	0,28	0,29	0,28	0,28	1,74	0,00	2,71	3,00	8,84	26223,00	100,00
	25			0,27	0,28	0,30	0,30	0,28	1,75	0,00	2,70	3,00	8,88	26227,00	100,00
Cenário 2 TOC	1	Inicial	1,5	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19220,00	100,00
	2			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19156,00	100,00
	3			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19192,00	100,00
	4			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19207,00	100,00
	5			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19201,00	100,00
	6			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19181,00	100,00
	7			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19210,00	100,00
	8			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19159,00	100,00
	9			0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,07	19182,00	100,00
	10			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19173,00	100,00
	11			0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,07	19190,00	100,00
	12			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19168,00	100,00
	13			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19143,00	100,00
	14			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19214,00	100,00
	15			0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,07	19225,00	100,00
	16			0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,07	19204,00	100,00
	17			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19186,00	100,00
	18			0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,07	19216,00	100,00
	19			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19197,00	100,00
	20			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19175,00	100,00
	21			0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,07	19187,00	100,00
	22			0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,07	19230,00	100,00
	23			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19186,00	100,00
	24			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19161,00	100,00
	25			0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	1,98	0,00	2,97	3,00	8,06	19215,00	100,00
Cenário 3 TOC	1	Inicial	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,00	14399,00	100,00
	2			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,01	14429,00	100,00
	3			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,01	14414,00	100,00
	4			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,01	14422,00	100,00
	5			0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,00	14389,00	100,00
	6			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,01	14390,00	100,00
	7			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,01	14418,00	100,00
	8			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,01	14422,00	100,00
	9			0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,00	14392,00	100,00
	10			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	1,99	0,00	2,99	3,00	8,00	14413,00	100,00
	11			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,01	14351,00	100,00
	12			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,01	14365,00	100,00
	13			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,01	14356,00	100,00
	14			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,01	14385,00	100,00
	15			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,01	14420,00	100,00
	16			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,01	14404,00	100,00
	17			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	1,99	0,00	2,99	3,00	8,00	14406,00	100,00
	18			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,01	14394,00	100,00
	19			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,01	14366,00	100,00
	20			0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	2,00	0,00	2,99	3,00	8,01	14399,00	100,00
	21														

Cenário 4 TOC	Intermediária	1,1	0,00	1,76	0,28	0,28	0,28	1,76	0,00	2,71	2,72	9,79	26247,00	99,98
			0,00	1,76	0,26	0,28	0,28	1,76	0,00	2,72	2,75	9,81	26120,00	99,98
			0,00	1,75	0,26	0,28	0,26	1,76	0,00	2,72	2,74	9,77	26189,00	99,98
			0,00	1,75	0,27	0,29	0,29	1,75	0,00	2,70	2,72	9,77	26215,00	99,99
			0,00	1,75	0,26	0,29	0,27	1,75	0,00	2,71	2,71	9,74	26158,00	99,98
			0,00	1,77	0,25	0,27	0,28	1,77	0,00	2,73	2,74	9,81	26130,00	99,98
			0,00	1,75	0,27	0,28	0,30	1,75	0,00	2,71	2,72	9,78	26198,00	99,98
			0,00	1,73	0,27	0,29	0,31	1,75	0,00	2,70	2,71	9,76	26244,00	99,98
			0,00	1,76	0,27	0,29	0,29	1,75	0,00	2,72	2,74	9,82	26182,00	99,99
			0,00	1,76	0,27	0,27	0,29	1,75	0,00	2,72	2,72	9,78	26186,00	99,98
			0,00	1,74	0,28	0,27	0,29	1,75	0,00	2,70	2,72	9,75	26223,00	99,99
			0,00	1,75	0,28	0,26	0,28	1,76	0,00	2,72	2,74	9,79	26177,00	99,99
			0,00	1,77	0,25	0,29	0,29	1,74	0,00	2,70	2,71	9,75	26160,00	99,98
			0,00	1,75	0,27	0,27	0,29	1,74	0,00	2,71	2,74	9,77	26199,00	99,98
			0,00	1,75	0,26	0,28	0,28	1,76	0,00	2,71	2,73	9,77	26173,00	99,97
			0,00	1,76	0,28	0,28	0,28	1,75	0,00	2,71	2,73	9,79	26234,00	99,98
			0,00	1,75	0,26	0,27	0,27	1,74	0,00	2,71	2,74	9,74	26187,00	99,98
			0,00	1,77	0,25	0,28	0,26	1,75	0,00	2,71	2,73	9,75	26148,00	99,99
			0,00	1,78	0,27	0,28	0,27	1,75	0,00	2,71	2,73	9,79	26164,00	99,98
			0,00	1,75	0,28	0,28	0,30	1,75	0,00	2,70	2,73	9,79	26218,00	99,99
			0,00	1,76	0,28	0,30	0,28	1,75	0,00	2,71	2,72	9,80	26189,00	99,97
			0,00	1,74	0,28	0,29	0,29	1,74	0,00	2,72	2,73	9,79	26237,00	99,98
			0,00	1,75	0,28	0,30	0,29	1,75	0,00	2,71	2,75	9,83	26192,00	99,98
			0,00	1,75	0,26	0,29	0,28	1,75	0,00	2,72	2,74	9,79	26172,00	99,98
			0,00	1,76	0,27	0,27	0,29	1,76	0,00	2,72	2,72	9,79	26190,00	99,98
Cenário 5 TOC	Intermediária	1,5	0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19185,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,03	1,98	0,00	2,97	2,99	9,99	19178,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19223,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,03	1,98	0,00	2,97	2,99	9,99	19179,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19198,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19155,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19189,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19192,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19201,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19179,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19141,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19139,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19193,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,03	1,98	0,00	2,97	2,99	9,99	19204,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19215,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19190,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19215,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,03	1,98	0,00	2,97	2,99	9,99	19211,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19184,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19172,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19226,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,03	1,98	0,00	2,97	2,99	9,99	19221,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,03	1,98	0,00	2,97	2,99	9,99	19249,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19188,00	99,99
			0,00	1,99	0,01	0,02	0,02	1,98	0,00	2,97	2,99	9,98	19156,00	99,99
Cenário 6 TOC	Intermediária	2	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14413,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14399,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14425,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14418,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14368,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14446,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14382,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14404,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14354,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14398,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14381,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14426,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14395,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14415,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14421,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14389,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14381,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14435,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14372,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14422,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14402,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14386,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14425,00	99,99
			0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	2,99	3,00	9,99	14396,00	99,99

	1			0,00	1,76	1,76	1,75	1,75	1,76	0,00	2,73	2,73	14,24	26200,00	99,97
	2			0,00	1,77	1,76	1,76	1,76	1,78	0,00	2,73	2,71	14,27	26159,00	99,97
	3			0,00	1,77	1,77	1,77	1,74	1,75	0,00	2,72	2,73	14,25	26155,00	99,96
	4			0,00	1,77	1,76	1,75	1,75	1,76	0,00	2,74	2,73	14,26	26183,00	99,97
	5			0,00	1,76	1,77	1,76	1,74	1,76	0,00	2,73	2,72	14,24	26212,00	99,97
	6			0,00	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	0,00	2,74	2,74	14,33	26141,00	99,97
	7			0,00	1,78	1,77	1,76	1,76	1,76	0,00	2,73	2,71	14,27	26178,00	99,97
	8			0,00	1,77	1,77	1,75	1,75	1,76	0,00	2,73	2,72	14,25	26183,00	99,97
	9			0,00	1,77	1,77	1,75	1,74	1,75	0,00	2,75	2,72	14,25	26173,00	99,97
	10			0,00	1,76	1,78	1,77	1,76	1,75	0,00	2,74	2,73	14,29	26161,00	99,97
	11			0,00	1,77	1,78	1,76	1,76	1,76	0,00	2,74	2,73	14,30	26121,00	99,97
Cenário 7	TOC		Final										14,27	26137,00	99,97
	12			0,00	1,77	1,77	1,75	1,75	1,76	0,00	2,74	2,73	14,31	26129,00	99,97
	13			0,00	1,78	1,77	1,77	1,76	1,77	0,00	2,73	2,73	14,18	26258,00	99,98
	14			0,00	1,74	1,77	1,75	1,75	1,74	0,00	2,72	2,71	14,24	26160,00	99,96
	15			0,00	1,76	1,77	1,77	1,75	1,77	0,00	2,74	2,71	14,27	26184,00	99,97
	16			0,00	1,77	1,77	1,74	1,77	1,76	0,00	2,73	2,74	14,28	26155,00	99,97
	17			0,00	1,78	1,76	1,75	1,76	1,76	0,00	2,73	2,75	14,29	26182,00	99,97
	18			0,00	1,77	1,76	1,76	1,75	1,75	0,00	2,73	2,72	14,24	26228,00	99,97
	19			0,00	1,76	1,75	1,75	1,75	1,74	0,00	2,73	2,72	14,20	26172,00	99,97
	20			0,00	1,77	1,76	1,75	1,75	1,77	0,00	2,74	2,72	14,26	26184,00	99,97
	21			0,00	1,75	1,76	1,75	1,76	1,76	0,00	2,73	2,73	14,24	26212,00	99,97
	22			0,00	1,77	1,77	1,75	1,73	1,75	0,00	2,73	2,72	14,22	26202,00	99,97
	23			0,00	1,76	1,75	1,76	1,74	1,76	0,00	2,72	2,72	14,21	26146,00	99,96
	24			0,00	1,78	1,77	1,76	1,77	1,77	0,00	2,76	2,73	14,34	26225,00	99,97
	25			0,00	1,76	1,75	1,75	1,75	1,77	0,00	2,73	2,71	14,22	26225,00	99,97
	1			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19216,00	99,98
	2			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19188,00	99,98
	3			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19195,00	99,98
	4			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19221,00	99,98
	5			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19218,00	99,98
	6			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19188,00	99,98
	7			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19203,00	99,98
	8			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19158,00	99,98
	9			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19178,00	99,98
	10			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19214,00	99,98
	11			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19201,00	99,97
Cenário 8	TOC		Final										15,93	19166,00	99,98
	12			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19149,00	99,98
	13			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19246,00	99,98
	14			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19176,00	99,98
	15			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19193,00	99,98
	16			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19221,00	99,98
	17			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19191,00	99,98
	18			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19210,00	99,98
	19			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19151,00	99,98
	20			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19162,00	99,98
	21			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19246,00	99,98
	22			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19211,00	99,98
	23			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19203,00	99,98
	24			0,00	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	0,00	2,99	2,99	15,93	19213,00	99,98
	25			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14397,00	99,98
	1			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14391,00	99,98
	2			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14420,00	99,98
	3			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14417,00	99,98
	4			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14396,00	99,98
	5			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14374,00	99,98
	6			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14414,00	99,98
	7			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14376,00	99,98
	8			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14372,00	99,98
	9			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14404,00	99,98
	10			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14386,00	99,98
Cenário 9	TOC		Final										16,00	14369,00	99,98
	11			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14379,00	99,98
	12			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14392,00	99,98
	13			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14403,00	99,98
	14			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14389,00	99,98
	15			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14408,00	99,98
	16			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14356,00	99,98
	17			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14367,00	99,98
	18			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14434,00	99,98
	19			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14405,00	99,98
	20			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14402,00	99,98
	21			0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,00	3,00	3,00	16,00	14400,00	99,98

APÊNDICE P –ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TOTAL DE ITENS PRODUZIDOS

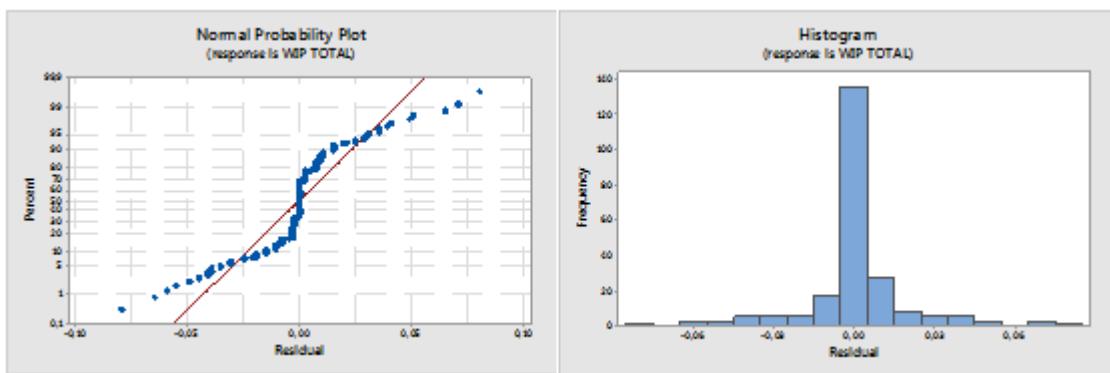


Teste Tukey:

$$TSD = q_{\alpha(k,N-k)} \sqrt{\frac{MQR}{N}} = 3,35 * \sqrt{\frac{763,87}{225}} = 18,52$$

Tempo de processamento do gargalo	Média total de itens	Diferença entre as médias	TSD	Análise
1,1 min	26188,09	6995,04	>TSD	Há diferença estatística
1,5 min	19193,05	4794,24	>TSD	
2 min	14398,81			

APÊNDICE Q – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO WIP MÉDIO



Teste Tukey:

$$TSD = q_{\alpha(k, N-k)} \sqrt{\frac{MQR}{N}} = 3,35 * \sqrt{\frac{0,00035}{225}} = 0,01$$

