

**DANIEL SPINDEL SVERNER**

**Redução do lead time em um fabricante de placas de circuito impresso: um  
estudo de simulação**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Diploma de Engenheiro  
de Produção

São Paulo

2017



**DANIEL SPINDEL SVERNER**

**Redução do lead time em um fabricante de placas de circuito impresso: um  
estudo de simulação**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Diploma de Engenheiro  
de Produção

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Mesquita

.

São Paulo

2017

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

Sverner, Daniel Spindel

Redução do lead time em um fabricante de placas de circuito impresso:  
um estudo de simulação / D. S. Sverner -- São Paulo, 2017.  
112 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1. Controle da Produção 2. Simulação de Sistemas 3. Produção Por  
Encomenda I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de  
Engenharia de Produção II. t.

Dedico este trabalho  
à Isaac Sverner, Lily  
Sverner, Chejwa  
Spindel e Daniel  
Spindel.



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Eduardo e Telma, e minhas irmãs, Carolina e Juliana, por todo suporte e amor. Por sempre me apoiaram ao longo da minha vida acadêmica e do meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À Isaac Sverner e todos os funcionários da Componel, que possibilitaram o desenvolvimento deste projeto.

Ao Professor Dr. Marco Aurélio de Mesquita, por toda a atenção, paciência e apoio no desenvolvimento deste trabalho de formatura.

Aos meus amigos de universidade, por marcarem o meu tempo na Escola Politécnica.

À Marion, por todo o amor, suporte e motivação.





*“O cientista não é o homem que fornece as  
verdadeiras respostas; é quem faz as verdadeiras  
perguntas. “*

Claude Lévi-Strauss (1908 – 2009)



## RESUMO

Em ambientes de produção sob encomenda, considera-se o lead time fundamental para a entrega do produto no prazo correto e a satisfação do cliente. Este projeto teve como objetivo propor melhorias com foco em reduzir o lead time produtivo e controlar o estoque em processo em uma fabricante de placas de circuito impresso, que fornece seus produtos para grandes fabricantes de bens eletrônicos de consumo. Realizou-se a revisão bibliográfica de temas relevantes para o projeto e estabeleceu-se a simulação computacional como principal método de análise para a melhoria contínua. Através da modelagem, implementação e validação de um modelo computacional, obteve-se uma ferramenta com acurácia suficiente para simular os processos da fábrica, identificar seus gargalos e realizar experimentos. Propôs-se um conjunto de melhorias, particularmente visando o aumento da capacidade do gargalo e o controle de estoque em processo por meio de um sistema Tambor-Pulmão-Corda. Mais especificamente, a melhoria envolve a expansão do tempo de operação do processo gargalo por meio da programação de turnos e o estabelecimento de um pulmão de estoque em processo para proteger o processo gargalo de interrupções na linha produtiva. Com a experimentação no modelo de simulação, verificou-se que as melhorias reduzem o lead time produtivo médio em 15%, o tempo médio de fila no gargalo em 70% e o nível médio de estoque em processo na fila em 66%. A recomendação do projeto passa pela implantação efetiva do método Tambor-Pulmão-Corda na linha de produção da fábrica, para executar continuamente os cinco passos da Teoria das Restrições e identificar novas oportunidades de melhoria. Para tal, necessita-se de um estudo mais aprofundado, levantando-se todas as ações operacionais requeridas para adaptar o sistema produtivo, que atualmente segue uma produção empurrada, para uma produção puxada do tipo Tambor-Pulmão-Corda.

Palavras-Chave: Controle de Estoque em Processo.Redução de Lead Time. Simulação de Eventos Discretos. Melhoria Contínua. Tambor-Pulmão-Corda.



## **ABSTRACT**

In Make-to-Order environments, short lead times are fundamental to have an adequate due date performance and obtain the client's satisfaction. This project's objective was to propose improvements that focused in reducing production lead time and in controlling Work-in-Process (WIP) in the production line of a printed circuit board manufacturer, that sells their products to large electronic consumer goods multinationals. A literature review of relevant topics to the project was conducted and a computational simulation model was built as the main analysis method for continuous improvement of the flow shop line. Through modelling, implementing and validating the computational model, an accurate enough tool was obtained to simulate the factory's processes, identify bottlenecks and test different scenarios. A set of improvements was proposed, particularly with a focus on increasing the capacity of the bottleneck and imposing more control on Work-in-Process through a Drum-Buffer-Rope (DBR) system. More specifically, the improvement involves expanding the operating times of the bottleneck station and establishing a stock buffer to protect the bottleneck from interruptions to the production's flow. By experimenting with the simulation model, it was verified that these improvements would reduce average production lead time by 15%, average queue time at the bottleneck by 70% and average WIP level at the bottleneck's queue by 66%. The project's recommendation involves effectively implementing the DBR system, to continuously be able to run the Theory of Constraints' five focusing steps and identify new opportunities for improvement in the system. To achieve that, a deeper analysis is needed, to assess all operational actions required to adapt the current push-type productive system to a pull-type Drum-Buffer-Rope system.

**Keywords:** Work-in-Process Control. Lead Time Reduction. Discrete Events Simulation. Continuous Improvement. Drum-Buffer-Rope.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Logomarca da Componel .....	23
Figura 2 - Mercado de PCIs .....	25
Figura 3 - Tipologia de Estratégias de Produção .....	30
Figura 4 - Sistema genérico de planejamento de produção .....	31
Figura 5 - Uma linha de produção CONWIP .....	34
<i>Figura 6 - Uma visão do ciclo DMAIC como uma metodologia do Lean Seis Sigma .....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 7 - Estrutura integrada de melhoria contínua: Teoria das Restrições e DMAIC .....</i>	<i>37</i>
Figura 8 - Uma abordagem de sete passos para um estudo de simulação .....	39
Figura 9 - Verificação e validação no projeto de um modelo de simulação .....	40
Figura 10 - Etapas do Projeto .....	44
Figura 11 - Tela de entradas para ajuste de curva .....	46
Figura 12 - Autofit de distribuições .....	47
Figura 13 - Exemplo de curva ajustada à histograma .....	47
Figura 14 - Notação do modelo conceitual .....	49
Figura 15 - Notação Simul8 .....	50
Figura 16 - Placa simples face .....	56
Figura 17 - Placa dupla face .....	56
Figura 18 - Corte transversal de uma placa multilayer .....	57
Figura 19 - Placa Metal Core .....	57
Figura 20 - Fluxograma dos processos da Componel .....	58
Figura 21 - Árvore de decisão de processos .....	59
Figura 22 - Sistema SRM Samsung .....	60
Figura 23 - Produção total de fevereiro por tipo de placa .....	63
Figura 24 - Produção total de março por tipo de placa .....	64
Figura 25 - Modelo conceitual (processos) .....	77
Figura 26 - Informações e recursos para o modelo .....	77
Figura 27 - Modelo de simulação da fábrica Componel (Simul8) .....	79
Figura 28 - Quantidade de PA e produtividade vs. liberação de entidades na produção .....	80
Figura 29 - Vazão vs. liberação de entidades na produção .....	81
Figura 30 - Porcentagem de utilização do tempo disponível .....	86
Figura 31 - Operação de um sistema DBR e planejamento local .....	88
Figura 32 - Zonas do pulmão de proteção à restrição .....	91
Figura 33 - Zonas do pulmão de recurso aplicadas ao modelo de simulação .....	98

Figura 34 - Utilização do AOI Externo na simulação.....	99
Figura 35 - Tamanho da fila do AOI Externo ao longo do tempo.....	100
Figura 36 - Distribuição do tempo em fila para o AOI Externo .....	100



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estratégias de Produção .....	29
Tabela 2 - Project Charter .....	54
Tabela 3 - Parâmetros críticos e não-críticos de entrada da simulação .....	64
Tabela 4 - Dados coletados para o projeto .....	66
Tabela 5 - Liberação de Ordens de Produção (OPs).....	66
Tabela 6 - Distribuições estatísticas de tempo de ciclo para cada operação.....	68
Tabela 7 - Tempos de movimentação .....	69
Tabela 8 - Tempos de set-up por operação .....	70
Tabela 9 - Tempos de parada por operação .....	70
Tabela 10 - Turnos e recursos em cada etapa .....	72
Tabela 11 - Relação de turnos e processos .....	73
Tabela 12 - Distribuição de operadores .....	74
Tabela 13 - Quantidade de máquinas por etapa .....	75
Tabela 14 - Índices de qualidade .....	76
Tabela 15 - Comparação da simulação à situação real da fábrica para validação .....	82
Tabela 16 - Comparação da simulação à situação real da fábrica (com ajustes no AOI).....	83
Tabela 17 - Resultados de simulação sob duas condições.....	87
Tabela 18 - Exemplo de programação de ordens no tambor sem padrão de turno na estação	89
Tabela 19 - Exemplo de programação de ordens no tambor com padrão de turno na estação	90
Tabela 20 - Resultados de simulação com expansão do tempo de operação no AOI.....	93
Tabela 21 - Resultados de simulação com expansão do tempo de operação no AOI e na prensagem .....	94
Tabela 22 - Resultados de simulação com uma máquina dedicada ao AOI Interno/Externo..	95
Tabela 23 - Preço médio de um painel multilayer e intervalo de margem de lucro .....	96
Tabela 24 - Análise financeira de retorno sobre investimento (payback) na compra de uma máquina AOI.....	96
Tabela 25 - Resultados finais da simulação comparados às metas do projeto de melhoria.....	99



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>AOI</b>	<i>Automated Optical Inspection</i>
<b>CNC</b>	Comando Numérico Computadorizado
<b>CONWIP</b>	Constant Work-in-Process
<b>DBR</b>	<i>Drum-Buffer-Rope</i>
<b>DMAIC</b>	<i>Define Measure Analyze Improve Control</i>
<b>FPY</b>	<i>First Pass Yield</i>
<b>KPI</b>	<i>Key Performance Indicator</i>
<b>MTS</b>	<i>Make-to-Stock</i>
<b>OP</b>	Ordem de Produção
<b>OPP</b>	<i>Order Penetration Point</i>
<b>PA</b>	Produto Acabado
<b>WLC</b>	Workload Control



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1. A Empresa .....	23
1.2. O Mercado de Placas de Circuito Impresso.....	24
1.3. Motivação do Projeto.....	26
1.4. Objetivo .....	26
1.5. Estrutura do Trabalho.....	27
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>29</b>
2.1. Estratégia <i>Make-to-Order</i> (MTO) .....	29
2.2. WIP/CONWIP.....	32
2.3. Teoria das Restrições.....	34
2.4. Drum-Buffer-Rope .....	35
2.5. DMAIC .....	35
2.6. Simulação.....	38
2.7. Conclusão da Revisão Bibliográfica .....	41
<b>3. MÉTODO .....</b>	<b>43</b>
3.1. Definição do problema.....	44
3.2. Coleta de Dados .....	45
3.3. Projeto e Validação do Modelo Conceitual.....	48
3.4. Implantação do Modelo Computacional.....	50
3.5. Verificação e Validação do Modelo Computacional.....	50
3.6. Experimentação e Propostas de Melhoria .....	51
3.7. Discussão de Resultados .....	51
<b>4. PROJETO DE MELHORIA – PARTE I .....</b>	<b>53</b>
4.1. Definição do problema.....	53
4.2. Produtos e Processos.....	55
4.2.1. <i>Simples Face</i> .....	56
4.2.2. <i>Dupla Face</i> .....	56
4.2.3. <i>Multilayer</i> .....	57
4.2.4. <i>Metal Core</i> .....	57
4.2.5. <i>Mapeamento de Processos</i> .....	58
4.3. Coleta de Dados .....	63

4.3.1.	<i>Liberção de Ordens de Produção</i> .....	66
4.3.2.	<i>Tempos de Ciclo</i> .....	67
4.3.3.	<i>Tempos de Movimentação</i> .....	68
4.3.4.	<i>Tempo de Setup e Paradas</i> .....	69
4.3.5.	<i>Operadores e Turnos</i> .....	71
4.3.6.	<i>Máquinas e Equipamentos</i> .....	75
4.3.7.	<i>Índices de Qualidade</i> .....	75
4.4.	<b>Projeto e Validação do Modelo Conceitual</b> .....	76
4.5.	<b>Implementação do Modelo Computacional</b> .....	78
4.6.	<b>Verificação do Modelo Computacional</b> .....	79
4.7.	<b>Validação do Modelo Computacional</b> .....	81
5.	<b>PROJETO DE MELHORIA – PARTE II</b> .....	85
5.1.	<b>Avaliação Preliminar de Sistemas de Produção Puxada</b> .....	85
5.2.	<b>Identificação do gargalo</b> .....	85
5.3.	<b>Exploração do gargalo</b> .....	87
5.4.	<b>Subordinação do Sistema ao Gargalo</b> .....	90
5.5.	<b>Elevação do Gargalo</b> .....	92
5.5.1.	<i>Replanejamento de Turnos</i> .....	93
5.5.1.1.	EXPANSÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO .....	93
5.5.1.2.	ALOCAÇÃO DE MÁQUINAS NOS TURNOS .....	94
5.5.2.	<i>Investimento em Novas Máquinas</i> .....	95
5.6.	<b>Proposta de Implantação de Melhoria</b> .....	97
6.	<b>CONCLUSÕES</b> .....	103
6.1.	<b>Síntese do Trabalho</b> .....	103
6.2.	<b>Limitações</b> .....	104
6.3.	<b>Desdobramentos</b> .....	104
7.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	107
	<b>APÊNDICE A – DADOS DE TEMPOS DE CICLO</b> .....	111

## 1. INTRODUÇÃO

Em um primeiro momento, esse capítulo introduz a empresa onde o trabalho de formatura é realizado. Em seguida, apresenta-se o problema e os objetivos do projeto. Por fim, é abordada a estrutura do texto do trabalho.

### 1.1. A Empresa

Este trabalho de formatura será realizado na empresa Componel, uma organização que produz placas de circuito impresso (PCIs). As placas produzidas na Componel podem ser divididas em alguns subtipos: simples face, dupla face, *multilayer* e *metal core*. As PCIs são componentes indispensáveis de televisores, controles remotos, computadores, circuitos e outros produtos eletrônicos.

Entender o histórico da organização auxilia formar uma imagem mais clara de sua conjuntura atual. A Componel existe há mais de trinta anos, tendo surgido como uma subdivisão da empresa CCE, uma fabricante de bens de consumo eletrônicos fundada em 1964. Em meados da década de 80, o Grupo CCE abriu a fábrica para suprir uma demanda interna por placas de circuito impresso. Ao final dos anos 90, dois fatores levaram o grupo a investir de forma mais focada nesta fábrica: uma alta demanda de outras empresas e a capacidade de produção da fábrica acima da demanda interna. Com isso, inaugurou-se a Componel Indústria e Comércio, cuja logomarca é representada na Figura 1.

Figura 1 - Logomarca da Componel



Fonte: Componel (2017)

Em 2013, a CCE foi vendida para a multinacional Lenovo, e o modelo de negócios da Componel foi repensado. A Componel passou a se dedicar exclusivamente a atender clientes externos. Atualmente, seus principais clientes são grandes fabricantes mundiais de aparelhos eletrônicos com produção no Brasil. Dentre esses clientes, estão Samsung, Microsoft, LG, Flextronics, entre outros. Historicamente, a Samsung é o cliente final de grande parte da produção anual da Componel, sendo que atualmente adquire uma fatia de 65% da produção total da empresa.

No processo produtivo, a fabricação de seus produtos entra no horizonte de planejamento a partir do recebimento de pedidos dos clientes, que incluem um arquivo eletrônico de CAD

(*Computer Aided Design*) com as especificações da placa. É importante a integração entre o cliente, o departamento interno de engenharia do produto e o PCP para garantir o atendimento dos requisitos do projeto do cliente e a adequação de processos da fábrica para produzir a placa especificada pelo cliente.

Visto que as especificações são fornecidas pelo próprio cliente e o planejamento da produção inicia-se no momento em que o pedido é recebido, o processo produtivo é um processo *Make to Order* (MTO), com uma produção em lote.

As empresas clientes da Componel possuem produção em solo brasileiro, porém importam a maioria dos componentes de suas mercadorias do exterior. A demanda pelos produtos da Componel ocorre em grande parte pela existência do Processo Produtivo Básico (PPB), definido e aprovado por meio da Lei n.º 8.387, de 30 de dezembro de 1991. A lei consiste na obrigatoriedade de utilização de uma cota de componentes produzidos nacionalmente na produção de televisores e outros produtos eletrônicos.

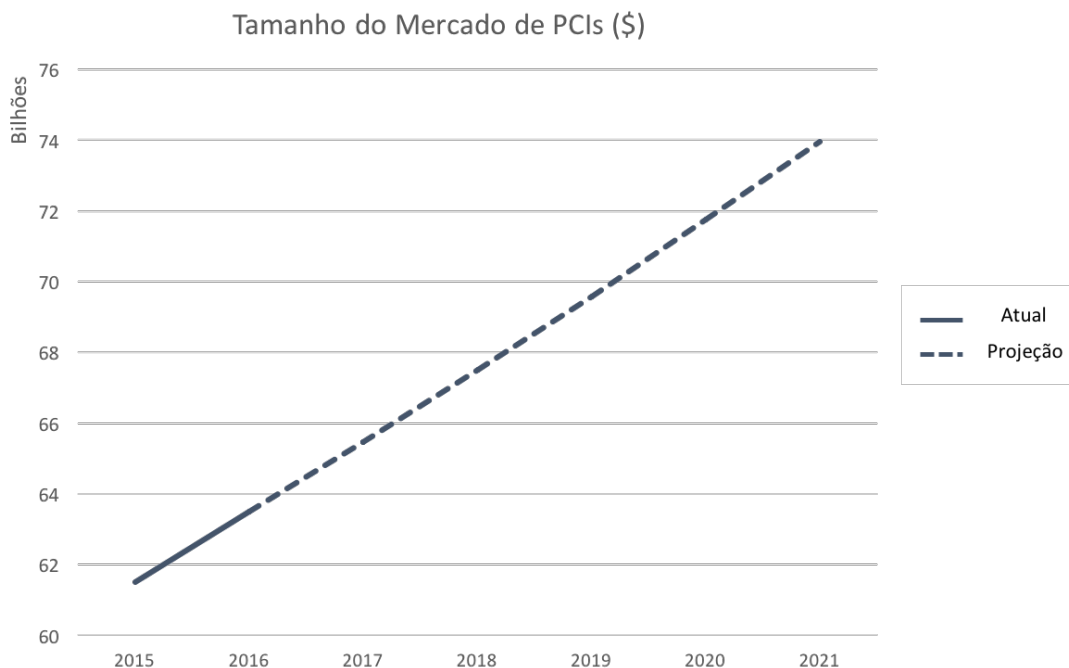
A estrutura física da Componel é segmentada da seguinte forma: em um prédio localiza-se a parte administrativa, e em dois galpões adjacentes localizam-se as áreas produtiva e de suporte à produção. Recentemente, a fábrica passou por um processo de auditoria obrigatória para fornecedores Samsung, empresa que é a cliente responsável pela maior parte da demanda da Componel. Na auditoria, foram estudados os padrões de qualidade de produto e processo, onde constatarem-se alguns pontos de melhoria. Atualmente, a fábrica encontra-se em um momento de dedicar esforços para incorporar práticas do *Lean Manufacturing* e de rearranjar seu layout, com suporte da Consultoria Inova Indústria, empresa de consultoria indicada pela auditoria.

## **1.2. O Mercado de Placas de Circuito Impresso**

Segundo dados da empresa BCC Research (2016), o mercado global de placas de circuito impresso cresceu de \$61,5 bilhões em 2015 para \$63,5 bilhões em 2016. A projeção é de que esse mercado chegue até \$73,8 bilhões em 2021, com uma taxa de crescimento anual composta de 3,1%, como ilustrado na Figura 2.



Figura 2 - Mercado de PCIs



Fonte: Elaborada pelo autor

Outro estudo de mercado, realizado e compilado em um relatório pela empresa ReportLinker (2017), faz projeções de receita similares e afirma que os principais fatores que explicam esse crescimento sólido são a demanda provenientes da produção de *smartphones* e *tablets*, além de um foco crescente em automação em indústrias como a automotiva, aeroespacial e militar.

No Brasil, dados sobre essa indústria são de mais difícil obtenção. A Associação Brasileira de Circuitos Impressos, Montagem de Placas, Teclado de Membrana e Componentes Eletrônicos (ABRACI) possui em seu website dados até o ano de 2012. A ABRACI (2012) contava até o atual momento com 47 empresas associadas. Em seu livreto estatístico deste ano, a ABRACI informa que o faturamento da produção nacional do setor foi de cerca de \$100 milhões, enquanto que o faturamento com importações foi de acima de \$1 bilhão.

Tendo em vista que a Componel atua somente no mercado nacional, tem-se, assim, uma dimensão da dificuldade de se competir no mercado brasileiro, onde as importações dominam grande parte da demanda interna, e consequentemente, do faturamento. Em relação à quantidade de fábricas, o setor vinha em uma tendência decrescente desde 2000 até o ano de 2012. Entre esses anos, houve uma redução de 12 fábricas em território nacional, totalizando 48 em 2012. O setor gera mais de 3 mil empregos diretos, número que também esteve mais alto no início dos anos 2000.

### 1.3. Motivação do Projeto

Este projeto de formatura é motivado pelo impacto positivo potencial sobre uma empresa familiar atuante em um mercado altamente competitivo, através da implantação de práticas de controle de estoque em processo. O controle de estoque processo está relacionado aos esforços de melhoria contínua na operação.

Atualmente, a fábrica possui poucos mecanismos de controle da produção. Aliada a isso, há dificuldade no cumprimento de prazos propostos aos clientes em períodos de grandes picos de demanda. No passado, o *lead time* atingiu o patamar de dez semanas, desde o momento de planejamento do pedido até a entrega final, quando o prazo padrão oferecido aos clientes era de oito semanas. No momento, a fábrica opera com um *lead time* baixo, de duas semanas.

O gerente de produção informou que o baixo lead time atual não representa uma consequência de melhorias em processos ou melhorias no planejamento e controle da produção. Na realidade, o lead time de duas semanas é uma consequência de um período de baixa demanda na segunda metade do ano de 2017. O gerente propôs ao autor deste projeto a seguinte questão: “Como ser eficiente produzindo 20 mil painéis por mês? “.

A empresa prevê um pico de demanda por placas de circuito impresso nos meses iniciais do ano de 2018, próximo às datas festivas e Copa do Mundo de 2018, onde seus clientes veem um grande aumento na procura por seus produtos. A empresa deseja controlar o seu estoque em processo e obter uma maior previsibilidade do comportamento do sistema produtivo, visando o pico de demanda, de forma a evitar que o lead time retorne ao patamar antigo.

Portanto, o problema-foco deste trabalho pode ser resumido pela necessidade de manter um *lead time* estável, de 8 semanas, dado o prazo padrão estabelecido com os clientes. Com as propostas de melhoria presente neste projeto, almeja-se identificar gargalos e controlar o estoque em processo do sistema produtivo, reduzindo o lead time em períodos de elevada demanda e cumprindo os prazos prometidos aos clientes.

### 1.4. Objetivo

Dada a motivação do projeto exposta acima, o principal objetivo deste trabalho é reduzir o lead time de uma placa de circuito impresso nos processos produtivos da Componel.

A definição de lead time, neste projeto, englobará apenas o tempo necessário para transformar matérias-primas em um produto acabado, segundo a definição de Tubino (2000). Dessa forma, subentende-se o termo lead time, abordado neste trabalho, como o lead time produtivo, desde o primeiro processo produtivo até a etapa final, onde o produto está pronto para ser

enviado ao cliente. Outros autores se referem ao lead time produtivo como *throughput time*, ou tempo de atravessamento. Para este trabalho, será utilizada a definição de Tubino (2000). Logo, o objetivo do trabalho pode ser sintetizado em:

*Avaliar, propor e implantar melhorias para a produção da Componel, com um foco em limitar o estoque em processo e, como meta final, reduzir o lead time produtivo.*

### **1.5. Estrutura do Trabalho**

O trabalho está organizado em seis capítulos. O primeiro consiste neste capítulo, onde se apresenta a empresa Componel, o mercado no qual ela está inserida, a motivação do projeto e objetivos que se esperam alcançar. O segundo capítulo cobre a revisão bibliográfica de cinco tópicos relevantes para a fundamentação teórica deste trabalho: estratégia de produção *Make-to-Order*, *Work-in-Progress* (WIP), Teoria das Restrições, *Drum-Buffer-Rope* (DBR), DMAIC e simulação de eventos discretos.

O terceiro capítulo apresenta e detalha o método utilizado no projeto de melhoria. O quarto capítulo detalha o processo de construção do modelo de simulação. O quinto capítulo apresenta a elaboração de cenários, análises e propostas de melhoria. Por fim, o último capítulo conclui o trabalho com considerações finais, limitações e desdobramentos.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica explora, detalha e assimila conceitos e aplicações de tópicos relevantes para o trabalho de formatura.

Primeiramente, analisa-se a estratégia de produção sob encomenda (*make to order* – MTO). Prossegue-se com a revisão com o tópico de controle de estoque em processo na produção (WIP), aprofundando-se em dois métodos: CONWIP e *Drum-Buffer-Rope* (DBR). Além disso, exploram-se temas relevantes para a metodologia deste projeto, como o DMAIC e a simulação como uma ferramenta de gestão de operações.

### 2.1. Estratégia *Make-to-Order* (MTO)

Empresas adotam diferentes estratégias de produção, de acordo com seu modelo de negócios, sua capacidade produtiva e seu relacionamento com os clientes. Bremer e Lenza (2000) definem e detalham as quatro estratégias de produção existentes como demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Estratégias de Produção

Estratégia de Produção	Características
<b>Produção para Estoque</b> <i>(Make to Stock – MTS)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sistemas com estoque de produto acabado baseado em previsões de demanda.</li> <li>– Custos de estocagem</li> <li>– Entrega imediata ou rápida para o cliente.</li> </ul>
<b>Montagem sob Encomenda</b> <i>(Assemble to Order – ATO)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Componentes e subconjuntos comuns são produzidos antecipadamente até chegada do pedido do cliente com especificações, iniciando-se a montagem.</li> <li>– Imprevisibilidade da demanda é gerenciada por buffer no estoque de subconjuntos.</li> <li>– Entrega para cliente a médio prazo.</li> </ul>

Continua

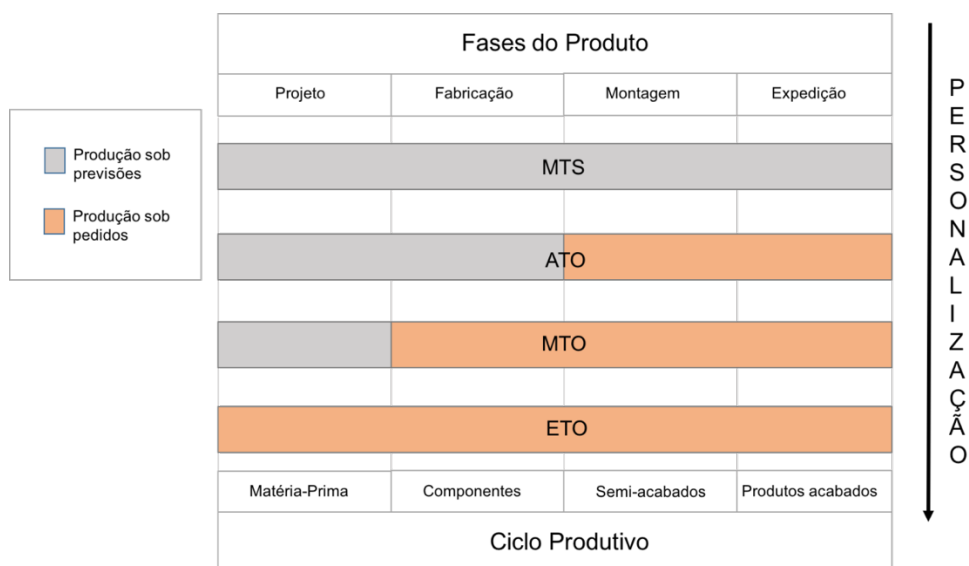
Continuação Tabela 1

<b>Estratégia de Produção</b>	<b>Características</b>
<b>Produção sob Encomenda</b> ( <i>Make to Order</i> – MTO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Produção é iniciada após o recebimento das especificações do cliente.</li> <li>– Entrega em um horizonte de médio a longo prazo.</li> <li>– Maior interação com o cliente.</li> </ul>
<b>Engenharia sob Encomenda</b> ( <i>Engineering to Order</i> – ETO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Baseado em requerimentos específicos do cliente, a empresa realiza o processo de engenharia e produção do produto.</li> <li>– Entrega a longo prazo.</li> <li>– Interação intensiva com o cliente.</li> </ul>

Fonte: Adaptado pelo autor de Bremer e Lenza (2000)

Bremer e Lenza (2000) classificam também as quatro estratégias quanto a sua tipologia, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Tipologia de Estratégias de Produção



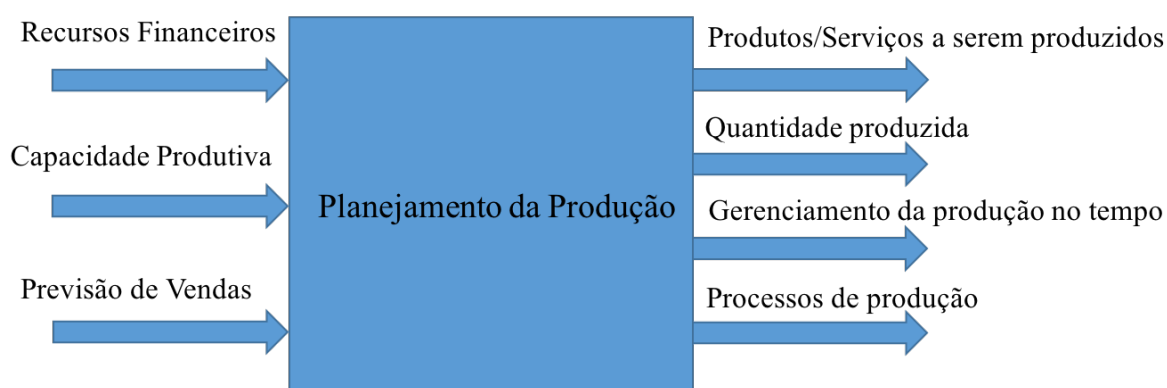
Fonte: Adaptado pelo autor de Bremer e Lenza (2000)

Um sistema completo de planejamento, programação e controle da produção contempla soluções importantes para atender demandas e expectativas dos clientes. Dentre essas ferramentas, estão o planejamento da necessidade de materiais, a gestão da demanda, o planejamento da capacidade e programação da produção (STEVENSON; HENDRY; KINGSMAN, 2005).

Para Tubino (2000), as entradas para estruturar um planejamento estratégico da produção consistem nas estimativas de vendas da empresa e os seus recursos, tanto financeiros quanto produtivos. Através disso, estabelece-se um planejamento para a produção em um horizonte de tempo de longo prazo.

Segundo Chiavenato (1990), planejar a produção é essencial para se alcançar maior eficácia e eficiência no sistema produtivo. O planejamento da produção busca definir de antemão o que deve ser feito, quando deve ser feito, quais são as partes envolvidas e os processos que serão postos em prática. Um sistema genérico de planejamento de produção é representado na figura 4.

Figura 4 - Sistema genérico de planejamento de produção



Fonte: Elaborado pelo autor

Em uma empresa MTO, o produto é associado no planejamento da produção ao cliente específico ao qual ele é destinado. Por outro lado, em uma empresa MTS a associação produto-cliente ocorre em um momento mais tardio (STEVENSON; HENDRY; KINGSMAN, 2005). O ponto onde se associa o pedido ao cliente específico para o qual esse pedido será destinado é denominado de *Order Penetration Point* (OPP) ou *Decoupling Point* (Ponto de Entrada de Pedido).

Com o OPP mais antecipado, empresas que operam sob o esquema MTO devem ter uma visão focada no cliente ao planejar o *lead time* de produção de seus produtos. Uma comparação realizada por Hendry e Kingsman (1989) afirma que o *lead time* é vital para a

satisfação do cliente, e os prazos devem ser acordados diretamente com o mesmo. Por outro lado, em empresas MTS o foco no lead time deve ser interno, sem envolvimento direto com o cliente no estabelecimento desse índice de desempenho do sistema.

Ademais, Hendry e Kingsman (1989) identificam a necessidade de se estabelecer datas de entrega relativamente curtas para se manter competitiva no mercado, sem negligenciar a capacidade de se manter o lead time acordado para promover a satisfação do cliente. Dessa forma, é crucial considerar a carga de produção para se propor uma previsão realista de data de entrega para o cliente.

No entanto, diversos fatores surgem em uma produção MTO, que provocam a variabilidade do *lead time*. Entre eles estão os atrasos na entrega decorrentes da flutuação de demanda (BEEMSTERBOER et al., 2017) e a dificuldade de planejar a capacidade e aceitar ou rejeitar pedidos (STEVENSON; HENDRY; KINGSMAN, 2005). Soman et al. (2004) definem os maiores problemas operacionais enfrentados por empresas MTO como o planejamento da capacidade, as decisões de aceitação de pedidos que chegam e a dificuldade de se obter uma alta aderência às datas de entrega.

Uma linha de produção que opera sob a estratégia MTO é descrita por alguns autores como sinônima à produção puxada. A demanda, seja de clientes externos ou internos, motiva a liberação de lotes de produção no sistema ou a movimentação destes lotes de uma etapa produtiva para a etapa seguinte (GASTERMANN et al., 2014). No entanto, ambientes MTO podem ter características de produção empurrada quanto ao planejamento de produção. Um exemplo é a utilização de um plano mestre de produção (PMP), considerando a demanda como uma combinação de uma previsão calculada (a partir de dados históricos de demanda e informações qualitativas de mercado) e pedidos realizados de clientes.

Hopp e Spearman (2011) formalizam a definição de sistemas de produção puxada e produção empurrada sob um ponto de vista do status de *WIP* (*Work in Progress*, ou Estoque em Processo) no sistema. No caso de um sistema de produção puxada, um limite ao *WIP* é previamente estabelecido, enquanto que isso não ocorre em um sistema de produção empurrada.

As seções seguintes se aprofundarão nos modelos *WIP/CONWIP*, Teoria das Restrições e *Drum-Buffer-Rope* (Tambor-Pulmão-Corda).

## **2.2. WIP/CONWIP**

*Work in Progress* (*WIP*) consiste no inventário em processo, no qual está sendo agregado valor, porém que ainda não se tornou um produto acabado. De forma mais formal, Hopp e Spearman (2011) definem o *WIP* como os estoques que existem entre o começo e o final de



um determinado roteiro de produção. Dessa forma, o estoque em processo é a totalidade dos produtos no intervalo aberto entre os pontos de estoque de matéria-prima e estoque de produto acabado. Na realidade, a definição formal para os sistemas opostos de produção apresentada na seção anterior não se aplica à risca quando se trata de WIP.

Como apontam Hopp e Spearman (2011), em um sistema puro de produção empurrada não se observa a inexistência de um limite de WIP. A fábrica pode ser sobrecarregada com um aumento inesperado de WIP em caso de qualquer interrupção na linha produtiva. A administração de uma fábrica se adaptará a extrapolação de WIP, sob um nível aceitável, em casos extremos, como a contratação de horas extras, renegociação dos prazos de entrega, entre outras soluções. No entanto, uma produção puxada evita que ações corretivas como essas tenham que ser tomadas.

Em termos de planejamento e controle de produção, a abordagem *Workload Control* (WLC) é uma abordagem adequada para ambientes MTO, ligeiramente diferente do CONWIP, que será abordado nesta seção. Purgstaller & Missbauer (2011) definem o WLC como uma abordagem na qual ordens são liberadas respeitando um valor pré-estabelecido de WIP, e exploram os diferentes modelos de liberação de ordens existentes na literatura segundo a abordagem.

O valor máximo de estoque em processo deve considerar o equilíbrio entre três metas conflitantes. Primeiramente, manter um nível baixo de WIP é essencial para uma produção puxada eficiente em um ambiente MTO. Em segundo lugar, é desejável se obter um lead time curto. Finalmente, deseja-se uma alta quantidade de produto acabado no final do sistema produtivo. Purgstaller & Missbauer (2011) apresentam um estudo de simulação para comparar dois tipos de modelos para liberação de ordens: modelos multi-período de otimização de liberação de ordens com mecanismos tradicionais de liberação de ordens embasadas na abordagem de *workload control*.

O sistema CONWIP (*Constant Work in Process*) surge como uma alternativa ao kanban como um sistema de produção puxada. De acordo com Hopp e Spearman (2011), o sistema CONWIP estabelece um limite para o estoque em processo, e um novo trabalho é liberado no sistema produtivo ao passo que outros trabalhos seguem adiante no fluxo. A figura 5 demonstra o funcionamento de uma linha CONWIP, onde cartões de produção são utilizados para sinalizar a entrada de novos trabalhos.



De acordo com Lustosa et al. (2008), a premissa do TOC é de que se maximiza o lucro quando se maximiza o fluxo percorrendo o sistema. Entretanto, a restrição do sistema limita o seu fluxo. Restrições, ou gargalos, podem ser tanto internos (processo de transformação, por exemplo) quanto externos (demanda do mercado consumidor ou cadeia de fornecimento de materiais).

#### **2.4. Drum-Buffer-Rope**

Em um ambiente TOC, o planejamento, programação e controle da produção são realizados por meio de uma ferramenta denominada *Drum-Buffer-Rope* (DBR) (SPROULL, 2012), traduzida para o português como Tambor-Pulmão-Corda. O DBR possui como função controlar o volume de WIP ao longo da linha de produção, baseando-se no ritmo do processo mais lento, ou seja, da operação gargalo.

Ainda segundo Sproull (2012), o ritmo de liberação de materiais, denominado como o tambor, é definido pela capacidade da operação gargalo. A corda consiste no mecanismo de comunicação entre o gargalo e o primeiro posto de liberação de materiais. O propósito da corda é de garantir que matéria-prima seja liberada no momento certo para que o gargalo sempre esteja trabalhando uma unidade de estoque em processo. No entanto, eventuais interrupções nas etapas à montante do gargalo e variações estatísticas podem causar paradas no ritmo de produção da etapa gargalo. Dessa forma, o pulmão é necessário e dimensionado para garantir que o gargalo sempre tenha estoque em processo para processar.

De acordo com Lustosa et al. (2008) e Sproull (2012), há três tipos de pulmões, ou *buffers*. São eles:

- Pulmão de Recurso: pulmão colocado antes de do recurso gargalo, para garantir a utilização máxima do gargalo em caso de paradas em outros recursos, que atrasam a produção.
- Pulmão de Mercado: Pulmão para garantir que o estoque em processo que sai do gargalo chegue, com segurança suficiente, na etapa final para despacho ao cliente (ambiente MTO) ou para ser armazenado (ambiente MTS).
- Pulmão de Montagem: Protege as etapas entre o recurso gargalo e a etapa onde ocorre uma montagem de peças.

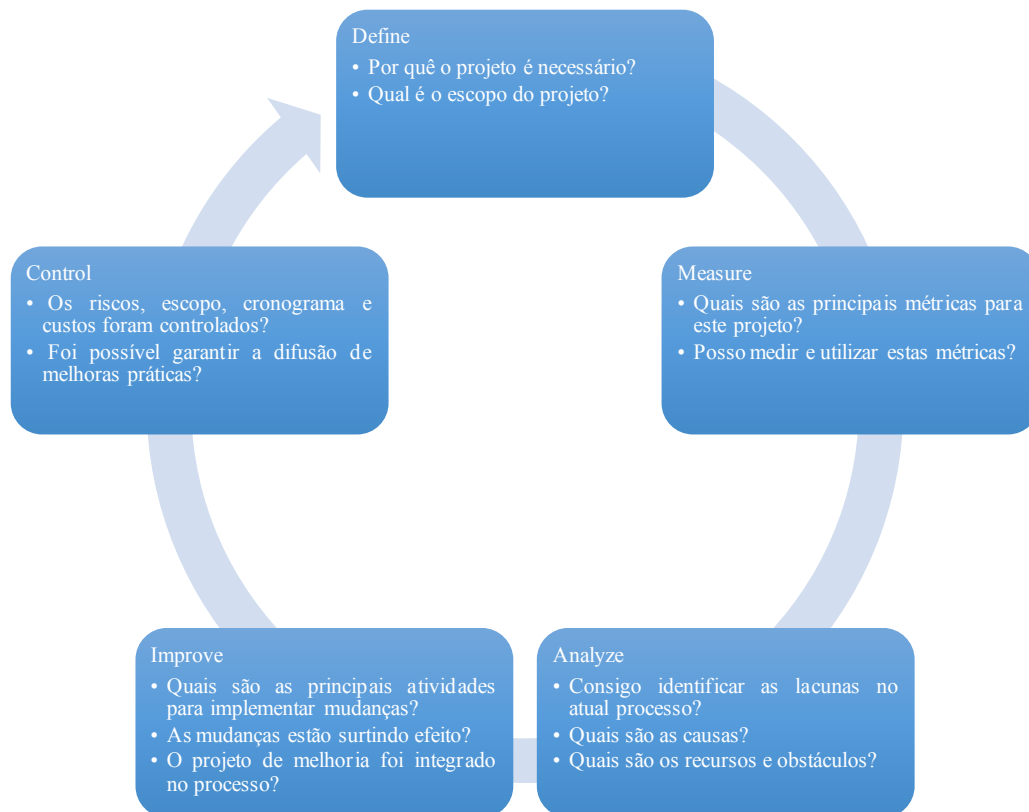
#### **2.5. DMAIC**

O DMAIC é a metodologia de solução de problemas do sistema *Lean Seis Sigma*. De acordo com Hopp & Spearman (2011), o Seis Sigma consistia inicialmente no termo formalizado como o conjunto de práticas de controle de qualidade na Motorola na década de 1980.

Posteriormente, esse sistema se desenvolveu para abranger o DMAIC e uma lógica estrutural da organização.

Sokovic et al. (2010) definem o DMAIC como uma abordagem analítica de melhoria de processos. Suas etapas estão interligadas e formam um processo iterativo, principalmente quando implementada por um time menos experiente no assunto. A Figura 6 detalha as perguntas que devem ser respondidas em cada etapa.

*Figura 6 - Uma visão do ciclo DMAIC como uma metodologia do Lean Seis Sigma*



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Sokovic et al. (2010)

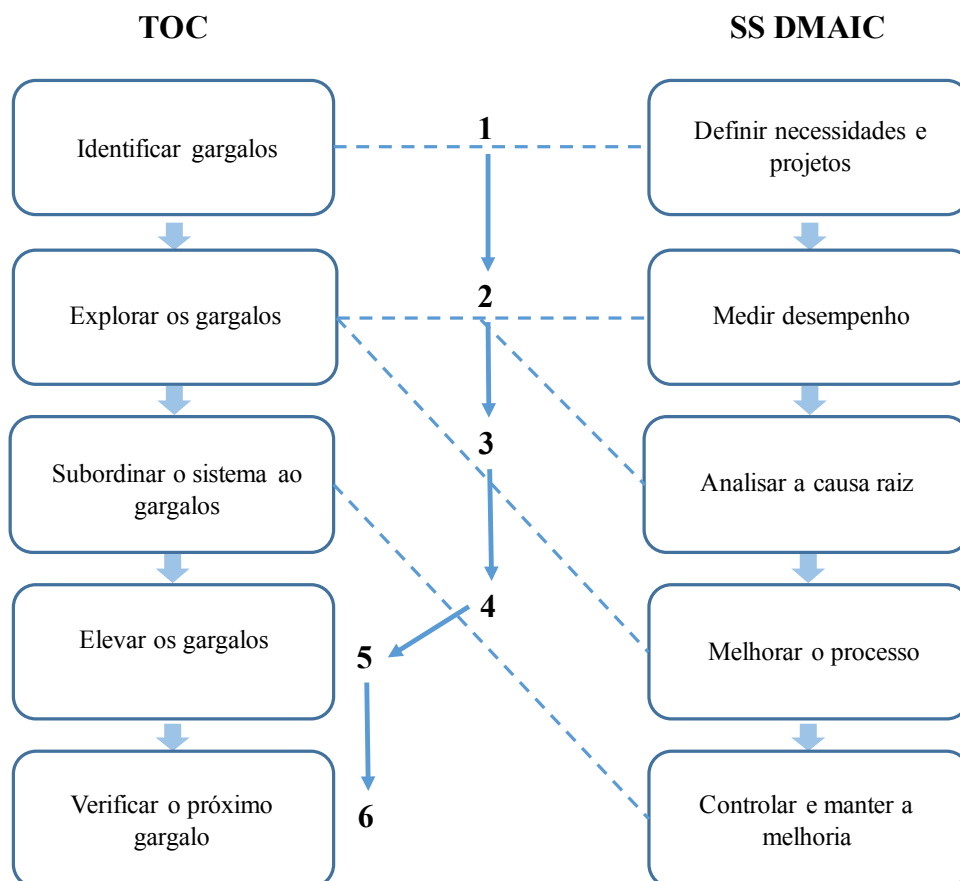
De forma mais simplificada, Southard et al. (2012) definem o DMAIC como um modelo de melhoria contínua onde os cinco passos consistem em:

- **Define:** Define o problema e as metas da atividade de melhoria.
- **Measure:** Mensuração do sistema atual.
- **Analyze:** Analisar os dados de forma a identificar oportunidades de melhoria para reduzir a lacuna entre o desempenho atual e as metas definidas.
- **Improve:** Explora as oportunidades para melhorar o sistema.
- **Control:** Monitorar e controlar o sistema após as melhorias.

Mehrjerdi (2011) aponta determinados autores que utilizaram a abordagem DMAIC para estruturar seus trabalhos. Ehie & Sheu (2005) interligaram a estrutura do DMAIC com os

passos da Teoria das Restrições, apresentados na seção anterior. A figura 7 indica como as duas metodologias se relacionam em cada etapa.

Figura 7 - Estrutura integrada de melhoria contínua: Teoria das Restrições e DMAIC



Fonte: Adaptado de Ehie & Sheu (2005)

Ehie e Sheu (2005) detalham, primeiramente, a semelhança do primeiro passo de cada metodologia, onde se deve identificar gargalos que afetam o desempenho global adequado do sistema. Em outras palavras, gargalos que atuam como obstáculos para alcançar objetivos como melhorar a vazão do sistema ou atender as necessidades do cliente. A segunda fase da estrutura integrada envolve medir o desempenho atual do processo e identificar as causas-raiz do problema, onde se atua com melhorias. Dessa forma, as etapas de *Measure* e *Analyze* estão envolvidas no segundo passo da TOC.

A terceira fase consiste em utilizar ferramentas do DMAIC para identificar como e onde as melhorias no processo gargalo podem ser implementadas. A quarta fase visa garantir que as melhorias implantadas sejam apoiadas pelo restante do sistema de produção. Por fim, as fases 5 e 6 da estrutura integrada derivam da TOC, onde deve-se verificar se a melhoria implantada atingiu a meta estabelecida na primeira fase. Caso a melhoria seja insuficiente, deve-se

considerar aumentar a capacidade do processo. Ademais, após a subordinação do sistema ao gargalo e sua eventual elevação, deve-se monitorar e identificar novos gargalos de produção. Ehie e Sheu (2005) utilizaram a abordagem proposta para reduzir a quantidade de defeitos em uma fabricante de peças automobilísticas. Mehrjerdi (2011) aponta que, ainda que o DMAIC esteja normalmente associado à redução de defeitos, a metodologia pode ser utilizada em processos produtivos e administrativos para reduzir erros em processos e variabilidade.

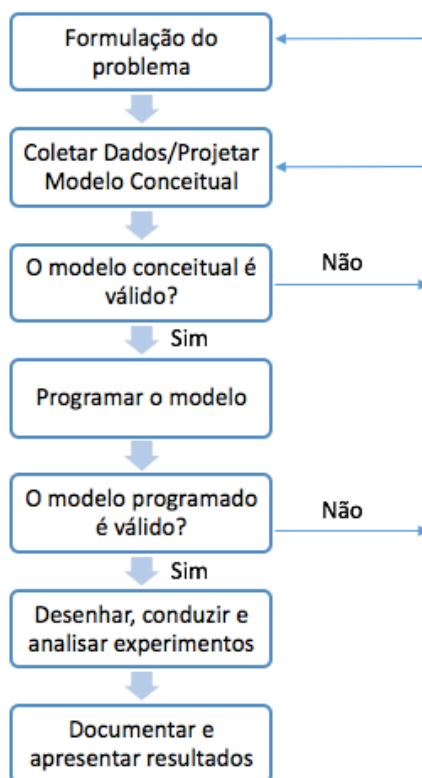
## **2.6. Simulação**

Em projetos DMAIC, a simulação é uma poderosa ferramenta. Ferrin et al. (2005) argumentam que a simulação é a ferramenta que proporciona maior robustez para um estudo de melhoria Lean Seis Sigma. Os autores atribuem essa afirmação a dois fatores: a capacidade da simulação de mensurar métricas operacionais e financeiras simultaneamente, e a facilidade de realizar análises de sensibilidade.

Mehrjerdi (2011) argumenta que a simulação permite testar alternativas em processos de forma ágil, sem riscos e interrupções em processos existentes. Em um modelo de simulação, consideram-se variações, incertezas e interdependências entre processos. Além disso, a interface visual da simulação, com animações da operação de processos, auxilia no processo de convencer as partes envolvidas sobre as melhores soluções. Por fim, modelos de simulação são reutilizáveis, podendo servir de ferramenta no futuro para melhorias contínuas. A simulação permite avaliar continuamente o desempenho de um processo ou sequência de processos, com simples ajustes nos parâmetros de entrada.

Law (2003) propõe uma metodologia de sete passos para um estudo de simulação de sucesso. Tal abordagem é ilustrada na figura 8.

Figura 8 - Uma abordagem de sete passos para um estudo de simulação



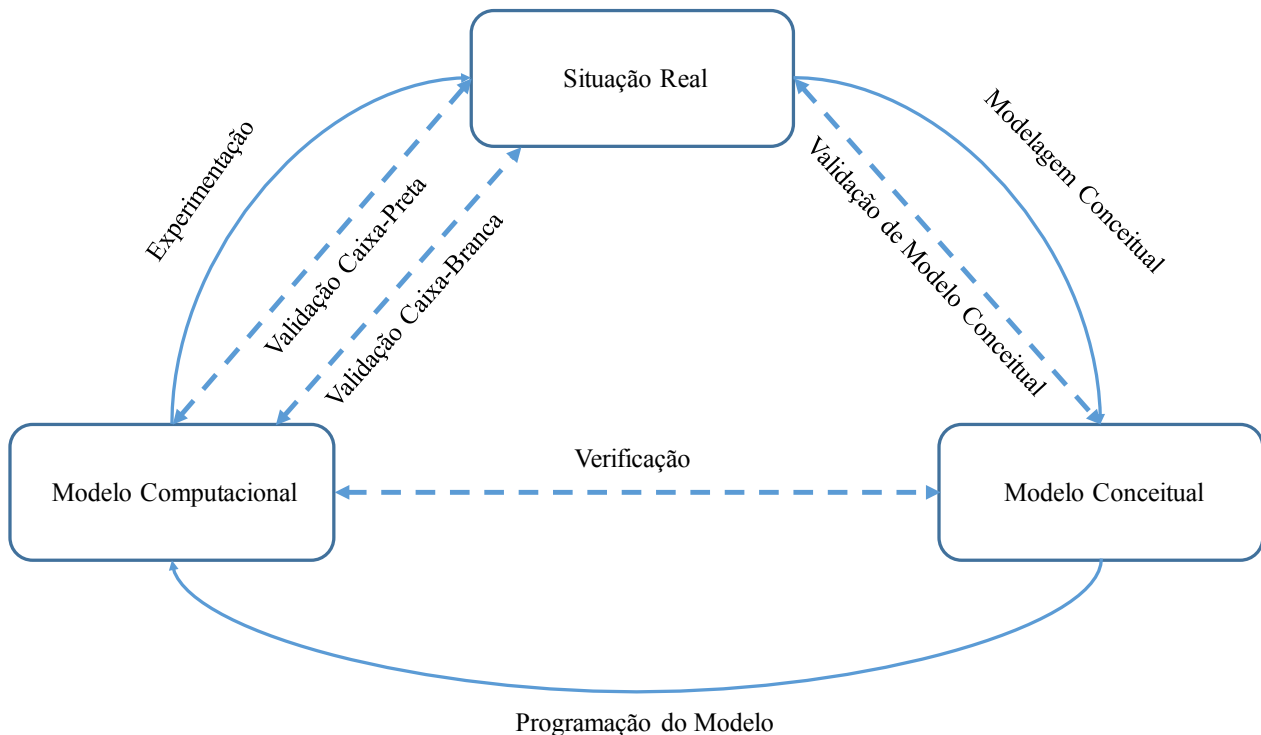
Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Law (2003)

A verificação e validação de um modelo de simulação, tanto na etapa de modelo conceitual quanto na etapa de modelo computacional, é crucial para se obter um modelo próximo da realidade.

De acordo com David (1992, apud Robinson, 1997), verificação consiste no processo de analisar que o projeto do modelo, detalhado pelo modelo conceitual, foi traduzido em um modelo computacional com um nível de acurácia adequado. A validação, por outro lado, garante que o modelo foi construído com acurácia suficiente para o objetivo visado. Em outras palavras, o processo de validação deve concluir que o modelo reflete a situação real ao qual ele está sendo comparado.

A figura 9 demonstra a relação entre os três níveis do projeto de um modelo (a situação real, o modelo conceitual e o modelo computacional) e as necessidades de verificação e validação entre todos.

Figura 9 - Verificação e validação no projeto de um modelo de simulação



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Robinson (1997)

Robinson (1997) aprofunda os métodos de validação e verificação apontados na figura. Os métodos relevantes para o projeto serão brevemente detalhados abaixo:

- **Validação do Modelo Conceitual:** Para projetar um modelo conceitual, o responsável por modelar o sistema deve obter um conhecimento aprofundado do sistema real e dos problemas existentes. Não existem métodos formais de validação do modelo conceitual; no entanto, uma especificação do projeto pode ser utilizada para essa finalidade, contendo os objetivos e a abordagem de modelagem do projeto. Distribui-se esse documento para aqueles que possuem conhecimento detalhado do sistema real, colhendo-se *feedback*.
- **Verificação:** verificação de dados de entrada do sistema, como tempos de ciclo e padrões de turnos, e da lógica do fluxo. Três métodos de verificação podem ser utilizados – inspeção do código computacional, inspeções visuais da simulação em ação ou inspeção de relatórios de resultados.
- **Validação de Caixa-Preta:** Na validação de caixa-preta, avalia-se o comportamento geral do modelo computacional. Espera-se que o modelo seja suficientemente acurado para refletir a situação real. Dessa forma, esse método



presume que com dados de entrada que simulam o sistema do mundo real, as saídas estejam em um nível idêntico ou próximo. A comparação com dados reais históricos é adequada para se validar o modelo computacional.

A simulação é utilizada extensivamente como uma ferramenta de melhoria em processos e no planejamento e controle da produção. Encontra-se na literatura diversos trabalhos relevantes, tanto em serviços quanto manufatura.

Southard et al. (2012) conduziram um estudo Seis Sigma DMAIC de simulação para avaliar os benefícios da implementação de tecnologia RFID (*Radio-frequency identification*) em processos cirúrgicos em hospitais. Sadat et al. (2013) utilizaram a simulação para propor a implantação de um sistema DBR em uma clínica pública de tratamento de pacientes com leucemia.

Darlington et al. (2015) investigaram o processo de seleção, projeto e implantação de um sistema puxado de produção do tipo DBR em uma fábrica de painéis automotivos. Com o auxílio de simulação, o sistema de controle da produção implementado foi capaz de reduzir a quantidade de WIP em 60% e economizar mais de 850 mil dólares para a empresa.

## **2.7. Conclusão da Revisão Bibliográfica**

O capítulo de Revisão Bibliográfica consolida conceitos e métodos relevantes para este trabalho. A estratégia de produção *Make-to-Order* é a estratégia adotada pela empresa em estudo, a Componel. O conceito de estoque em processo, referido neste trabalho como WIP, é fundamental para o desenvolvimento do trabalho, bem como seus métodos de controle e planejamento, como o DBR. Por fim, a metodologia do projeto, abordada no capítulo seguinte, se apoia na utilização da simulação como uma ferramenta de melhoria contínua do DMAIC.



### 3. MÉTODO

Este projeto de formatura possui como objetivo propor e implantar melhorias para reduzir o lead time e controlar o estoque em processo no sistema produtivo. Para atingir este objetivo, deve-se estudar a situação atual da fábrica da Componel, avaliando gargalos e limitações e testar hipóteses, simulando o processo produtivo sob diferentes parâmetros e condições. Por fim, deve-se propor melhorias que reduzam o lead time e o estoque em processo da Componel com um foco no planejamento e controle da produção.

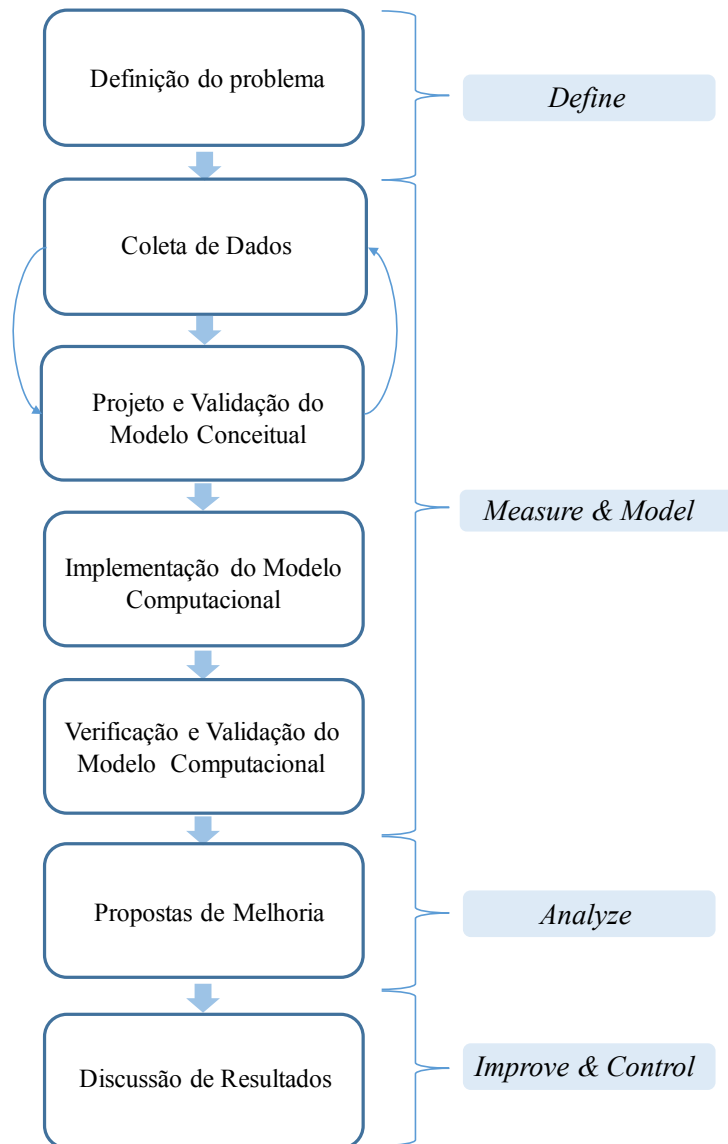
Para atingir o objetivo, é necessário seguir uma metodologia bem definida e ajustada às necessidades do projeto. Propõe-se, como base para a metodologia do projeto a utilização da metodologia de resolução de problemas com melhoria contínua do Lean Seis Sigma, o DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*), segundo a definição de Southard et al. (2012).

Dado o foco do projeto em utilizar ferramentas de simulação para mensurar e analisar o sistema produtivo, propõe-se um passo adicional ocorrendo simultaneamente às etapas *Measure e Analyze: Model* (Modelar). Outra metodologia que será utilizada de inspiração para construir a metodologia do trabalho de formatura será a abordagem de sete passos para conduzir um estudo de simulação, proposta por Law (2003), detalhada no capítulo anterior.

Dessa forma, o projeto segue uma estrutura definida, tomando a metodologia de estudo de simulação proposta por Law como foco central e aplicando a abordagem de melhoria contínua do Lean Seis Sigma, de forma que os passos de melhoria contínua sejam um meio para participação ativa dos responsáveis diretos pelo planejamento e controle da produção da Componel. Especificamente para este projeto, o modelo de simulação construído foi elaborado a partir de uma abordagem participativa entre o autor e os responsáveis por Engenharia de Processo, PCP e Departamento Comercial da Componel, principalmente na coleta de dados e na validação do modelo conceitual e modelo computacional.

As etapas envolvidas no estudo constam na Figura 10. As etapas serão detalhadas individualmente ao longo deste capítulo.

Figura 10 - Etapas do Projeto



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.1. Definição do problema

Primeiramente, define-se o problema a ser resolvido pelo projeto. Como mencionado na motivação do projeto, o problema é definido como a necessidade de reduzir o lead time e controlar o estoque em processo para melhor atender a alta demanda. Nesta etapa da metodologia, o problema será melhor detalhado, bem como as premissas relevantes para o desenvolvimento da solução. Para marcar o ponto de início do projeto com a Componel, o documento *Project Charter*, de frequente utilização em projetos de melhoria DMAIC, será utilizado. Nele, estarão definidos:

- Informações do projeto: Título, local, responsáveis

- Detalhes do projeto: Definição do problema, descrição do problema, definição de metas do projeto de melhoria
- Escopo: O que está incluído e o que está excluído do escopo do projeto
- Cronograma proposto

### 3.2. Coleta de Dados

A etapa de coleta de dados da metodologia do projeto consiste em coletar dados relevantes para a construção da simulação do processo produtivo das placas de circuito impresso. Primeiramente, para se elaborar o modelo conceitual, é necessário mapear os processos de produção pelos quais uma placa de circuito impresso é submetida. Um fluxograma havia sido previamente elaborado pelo departamento de Produção da Componel. Mapeado o sistema, parte-se para a realização da coleta de dados em campo.

Os dados a serem coletados devem ser diretamente a definição dos parâmetros do modelo e os indicadores de desempenho. Dessa forma, antes da coleta de dados, deve-se definir os dados relevantes para a implementação computacional da simulação.

Os dados de tempos coletados (tempos de ciclo, por exemplo) serão coletados presencialmente no chão de fábrica, por cronometragem, e inseridos em uma planilha do Microsoft Excel. Em seguida, será utilizado o software Stat::Fit, desenvolvido pela *Geer Mountain Software Corporation*. Como indicado por Chwif et al. (2013), o Stat::Fit permite ajustar um conjunto de dados à distribuição estatística mais adequada, processo denominado ajuste de curvas, ou, em inglês, *distribution fitting*. Os tempos de processamento, ou tempo de ciclo, são definidos em minutos/ciclo. Estabelece-se a necessidade de se coletar uma amostra de 50 tempos de ciclos em cada etapa. Esse limite de tamanho de amostra foi definido por duas razões. A primeira razão considera que 50 valores consistem em uma amostra suficientemente adequada para se obter os parâmetros da curva de distribuição de tempo de ciclo que melhor se ajusta à cada etapa.

A segunda razão pela qual 50 tempos serão coletados é que a versão educacional, utilizada para este trabalho de formatura, possui um limite máximo de cinquenta dados a serem avaliados para o ajuste de distribuição.

Para considerar os tempos de ciclo de forma precisa no modelo, deve-se ajustar os dados coletados por cronometragem à distribuição estatística mais adequada. O software Stat::Fit será utilizado. Como comentado anteriormente, o software limita a amostra ao tamanho de 50 entradas. Porém, há uma segunda limitação: A versão educativa contém apenas seis tipos de

distribuições de probabilidade, sendo quatro contínuas (normal, exponencial, log-normal e uniforme) e duas discretas (Binomial e Poisson).

Esse trabalho assume a premissa de que as distribuições existentes nesta versão no software são suficientes para definir adequadamente o comportamento do tempo de ciclo em cada etapa produtiva.

Para efeito de demonstração da metodologia a ser utilizada para o ajuste de curvas de tempo de ciclo das etapas produtiva, uma amostra genérica foi utilizada como exemplo. Primeiramente, os valores são introduzidos na interface inicial do programa. A figura 11 representa a amostra, com 30 valores.

Figura 11 - Tela de entradas para ajuste de curva

Interval	Points
1	5
2	4
3	5
4	6
5	3
6	2
7	8
8	6
9	5
10	4
11	8
12	4
13	6
14	5
15	7
16	4
17	3
18	8
19	7
20	6
21	5
22	4
23	5

Fonte: Captura de tela do Stat::Fit (2017)

Em seguida, a função *Autofit* do programa é acionada. Assim, as distribuições estatísticas mais adequadas são imediatamente geradas, e apresentadas na figura 12. A coluna *rank* identifica a qualidade do ajuste da curva ao conjunto de dados introduzidos no passo anterior. Dessa forma, a distribuição com *rank* apresenta o melhor ajuste possível dentre as distribuições.

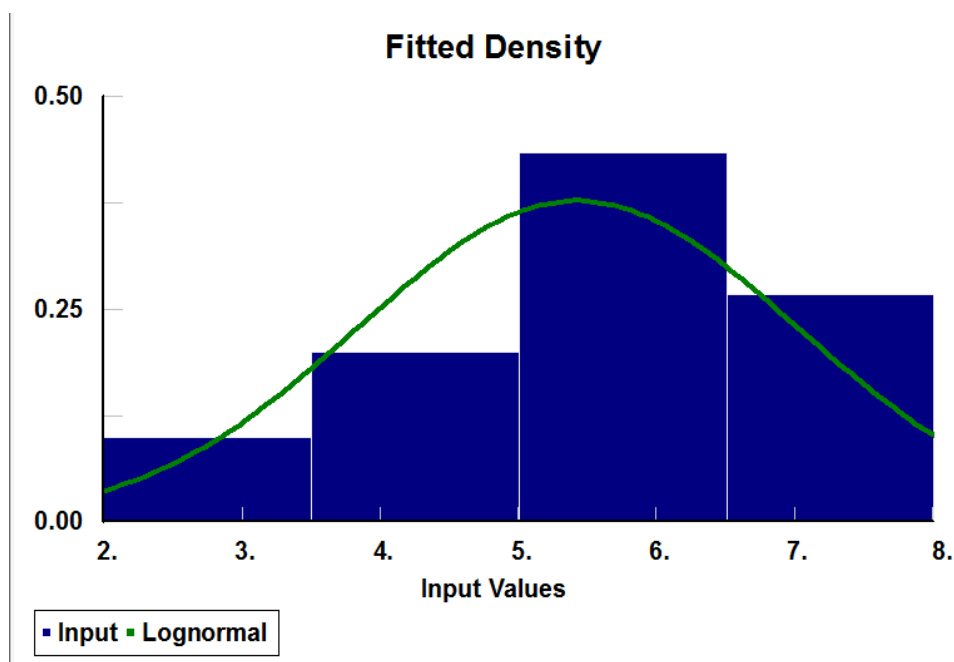
Figura 12 - Autofit de distribuições

autofit of distributions		
distribution	rank	acceptance
Lognormal(-466, 6.16, 0.00336)	100	do not reject
Normal(5.43, 1.58)	98.8	do not reject
Uniform(2, 8)	1.87	do not reject

Fonte: Captura de tela do Stat:Fit (2017)

Por fim, é possível visualizar o gráfico de cada distribuição, e analisar o ajuste de forma visual. A figura 13 traz um exemplo disso, onde curva log-normal está ajustada sob o histograma de dados da amostra.

Figura 13 - Exemplo de curva ajustada à histograma



Fonte: Captura de tela do Stat:Fit (2017)

Como regra, o modelo de simulação adotará os parâmetros da distribuição estatística com *rank* de máximo valor para descrever o tempo de ciclo de cada etapa.

Há um conjunto de indicadores que serão coletados através da simulação, e que servirão para avaliação do desempenho do sistema produtivo ao se contrapor a situação atual à cenários alternativos.

O primeiro indicador consiste no nível de WIP médio no sistema. Incluir esse indicador no escopo do estudo é importante pois ele indica a variação de WIP ao longo do tempo de simulação. É possível observar os níveis de estoque em processo com o sistema operando sob diferentes condições.

A vazão, ou *throughput*, também será acompanhada na simulação. Espera-se medir, através deste indicador, a produtividade do sistema. Esse indicador pode ser calculado através de uma adaptação da Lei de Little, uma fórmula inicialmente proposta por Little projetada para a teoria de filas. A Lei de Little é apresentada abaixo:

$$L = \lambda W$$

Onde

$L$  = Quantidade média de entidades no sistema

$\lambda$  = Taxa de entrada de entidades

$W$  = Tempo médio de uma entidade no sistema

Ou, em outros termos:

$$WIP = Vazão * Lead Time$$

Reorganizando a equação, temos que:

$$Lead Time = \frac{WIP}{Vazão}$$

Onde

WIP = estoque em processo médio no sistema

Vazão = Taxa de saída média de uma unidade acabada no final do sistema (igual à taxa de entrada em regime estacionário)

Lead Time = Tempo médio que o estoque em processo permanece no sistema

O terceiro indicador consiste nos tempos médios de fila e tamanhos médios de fila (medidos em WIP) nas células de produção da fábrica. Particularmente, é importante acompanhar a fila do processo gargalo, e observar seu comportamento sob diferentes situações. O maior tempo de fila será identificado e detalhado no próximo capítulo.

### **3.3. Projeto e Validação do Modelo Conceitual**

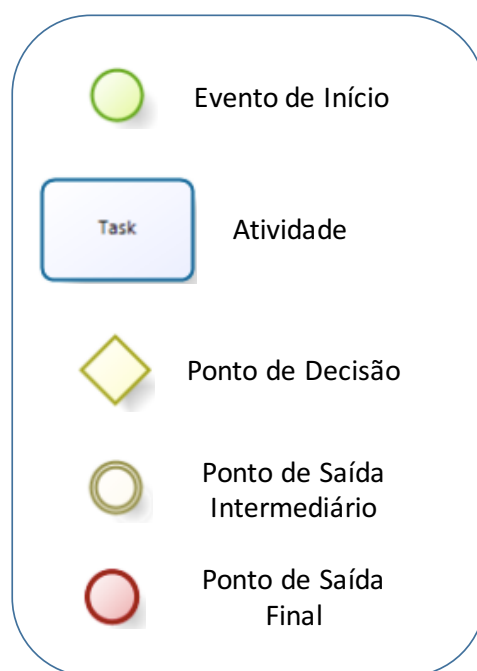
A etapa de projeto do modelo conceitual será feita em paralelo à etapa de coleta de dados. O mapeamento de processos na fábrica da Componel serve como base para a elaboração do modelo conceitual, garantindo que as relações entre processos serão cumpridas no modelo computacional. Além das relações intraprocessos, é crucial entender o comportamento de cada processo. O comportamento de cada processo é ditado pelos seus recursos, operação de



turnos e tempo de ciclo. Outro fator a ser entendido é a quantidade de painéis processados a cada tempo de ciclo em cada célula de produção.

O modelo conceitual será projetado através da utilização do software *Bizagi Process Modeler*, que permite a fácil visualização do fluxo de processos. A figura 14 ilustra a notação do modelo conceitual.

Figura 14 - Notação do modelo conceitual



Fonte: Elaborado pelo autor

O evento de início representa a entrada (liberação) da ordem de produção na linha, com o incremento no estoque em processo. Ele será conectado ao primeiro processo da operação produtiva. O bloco de atividades, por sua vez, representa os processos no qual ocorrem algum tipo de transformação (física, química ou fotográfica) do estoque em processo. É importante notar que entre as atividades existem filas, que não são visualmente representadas no modelo conceitual.

O ponto de decisão será utilizado em conjunto com processos de inspeção de qualidade, onde o operador responsável pelo processo deve decidir o destino adequado de cada placa inspecionada. O ponto de saída intermediário representa o descarte de placas reprovadas na qualidade, sem possibilidade de retrabalho para recuperação. Trata-se das placas encaminhadas para sucateamento. Por fim, o ponto de saída final ocorre diretamente após o último processo e representa um decremento de WIP no sistema.

Este modelo e as premissas relevantes para a construção do modelo de simulação serão validados com os responsáveis pela Engenharia de Processo e PCP da Componel, antes de prosseguir com a próxima etapa do projeto.

### 3.4. Implantação do Modelo Computacional

O modelo computacional será implantado no Simul8, software de simulação de eventos discretos. O Simul8 possui uma curva de aprendizagem rápida, permitindo uma fácil usabilidade tanto pelo autor deste projeto, quanto pela empresa.

Os dados de entrada coletados e detalhados na etapa de Coleta de Dados serão utilizados para parametrização da simulação.

A notação básica do programa é representada na figura 15. Neste trabalho, cada elemento da notação será denominado como um bloco. Cada bloco é utilizado para representar um elemento de simulação, seja o ponto de entrada de uma entidade, uma fila, uma atividade ou um ponto de saída da entidade. Adicionalmente, o bloco de recurso é utilizado quando um recurso é necessário para se realizar determinada atividade ou processo.

Figura 15 - Notação Simul8



Fonte: Elaborado pelo autor

Os blocos são combinados e ligados por setas, para formar o modelo de simulação. Diversos parâmetros podem ser ajustados nos diferentes blocos. No ponto de início, por exemplo, determina-se o intervalo entre chegadas de entidades no sistema. Em cada atividade, determina-se a distribuição estatística de seu tempo de duração, os recursos necessários, a eficiência, entre outros.

Ademais, é possível avaliar KPIs de resultado de cada bloco e gerar gráficos para acompanhamento em tempo real ao se executar a simulação. Combinam-se diferentes KPIs para se gerar um relatório de resultados. Tais relatórios serão utilizados para comparação de cenários da fábrica nos capítulos 4 e 5.

### 3.5. Verificação e Validação do Modelo Computacional

Para a finalidade de verificação do modelo computacional, a simulação será verificada para quaisquer erros e sujeita a diferentes parâmetros, inclusive situações extremas, para observação de seu comportamento. Espera-se verificar se a lógica computacional está correta e se variações nos parâmetros e características do modelo permitem a realização da simulação adequadamente.

Em seguida, para se validar o modelo computacional no ambiente de simulação, será seguida a abordagem de “Validação de Caixa-Preta” (*Black-box validation*), de Robinson (1997), apresentado anteriormente no capítulo de Revisão Bibliográfica. Com as informações coletadas na etapa de Coleta de Dados, os parâmetros que refletem a situação real da fábrica serão programados no modelo. Em seguida, será feita uma comparação entre o relatório de saída do ambiente de simulação com o sistema real da fábrica no período considerado, de acordo com os indicadores definidos na etapa de Coleta de Dados do capítulo seguinte.

A quantidade de replicações necessárias de simulação será dimensionada com o objetivo de se obter um nível de precisão de 5% na estimativa da média dos principais indicadores de desempenho (*Key performance indicators*, ou KPIs) do relatório de saída.

### **3.6. Experimentação e Propostas de Melhoria**

Feita a validação do modelo de simulação, a etapa de experimentação será conduzida. Múltiplos laços de ajustes serão feitos no modelo para testar o desempenho do sistema sob diferentes condições. O principal teste a ser realizado envolve estabelecer um limite para o controle de estoque em processo. Isso pode ser feito tanto para o sistema como um todo, quanto para um conjunto menor de processos dentro do sistema. As alternativas de melhoria serão testadas através da simulação, e validada pela comparação dos KPIs do relatório de saída em relação aos KPIs da situação atual.

### **3.7. Discussão de Resultados**

Os resultados do projeto serão discutidos. A proposta de melhoria será detalhada de forma mais aprofundada, bem como os passos a serem seguidos para sua implementação. Além disso, essa porção do trabalho envolve sintetizar os resultados obtidos, apresentar as limitações do estudo e os subsequentes desdobramentos que o trabalho de formatura traz.



## 4. PROJETO DE MELHORIA – PARTE I

Este capítulo está estruturado de acordo com as etapas de *Define, Measure, Model & Analyze* que servem de referência para a metodologia apresentada na seção anterior. Inicia-se pela etapa de definição do problema e as premissas que norteiam o projeto. Em seguida, aborda-se a etapa de coleta de dados, necessária posteriormente para a construção da simulação. Após a etapa de coleta de dados, apresenta-se um modelo conceitual para o sistema produtivo da Componel.

Em seguida, o capítulo apresenta o modelo propriamente programado no *software* Simul8. Por fim, a rodada inicial de experimentos simula a condição atual da fábrica para colher os principais KPIs, que servirão de referência para comparação, aos cenários alternativos simulados no capítulo seguinte.

### 4.1. Definição do problema

A fábrica experimentou um período de alta demanda nos meses iniciais do ano de 2017. O pico de demanda acarretou em uma dificuldade em cumprir prazos propostos aos clientes adequadamente. O alto lead time explica esse efeito: Frente a prazos prometidos de 8 semanas aos clientes, a Componel tinha um lead time de 10 semanas desde o momento do pedido até a entrega do produto ao cliente.

Como mencionado anteriormente, o objetivo do projeto é reduzir o lead time sob condições de alta demanda. Dessa forma, as atividades de melhoria do projeto possuem como meta explorar e avaliar métodos de controle de estoque em processo e redução do lead time produtivo da produção, simulando essas condições em um modelo válido de simulação da linha de produção.

O Project Charter representado na tabela 2 traz a definição do problema, as partes interessadas envolvidas e o objetivo. Tal documento foi utilizado para lançar o projeto de melhoria contínua.

Tabela 2 - Project Charter

Produto/Serviço Impactado	Linha Multilayer	Líder do Time de Melhoria	Daniel Sverner				
Unidade de Negócios	Fábrica Componel						
Patrocinador	Isaac Sverner						
Elemento	Descrição	Especificações					
1. Processo	Nome do processo a ser melhorado	Controle de estoque em processo na linha produtiva da placa tipo <i>multilayer</i> .					
2. Descrição do Projeto	Quais problemas serão resolvidos? Qual é o propósito do projeto?	Os problemas a serem resolvidos são o elevado nível de estoque em processo e o alto lead time produtivo da fábrica em períodos de pico de demanda.					
3. Objetivo	Quais métricas serão melhoradas, qual o desempenho atual destas métricas e qual a meta quantitativa de cada melhoria?	Métrica	Atual	META	% Melhoria	unidades	
		Lead Time Produtivo (semanas)	2	1,5	25%	0,5	
		WIP Médio na Fila	3000	2000	33%	1000	
		Tempo de Fila no Gargalo	6 dias	3 dias	50%	3	
4. Escopo	O que é considerado no projeto? Quais etapas/processos/informações?	<b>Dentro do Escopo</b> – Apenas as etapas produtivas das placas <i>Multilayer</i> , liberação de ordens nos meses de fevereiro e março. Parâmetros de entrada no modelo de simulação são: Tempos de Ciclo, Recursos e Máquinas, Programação de Turnos, Tempos de Movimentação, Tempos de Setup e Parada.					
5. Justificativa de Negócio	Justificativa para este projeto. Qual a sua importância? Por quê o projeto é crítico para o sucesso do negócio?	O projeto é importante para atingir uma melhoria no controle de WIP e redução do lead time produtivo médio, consequentemente obtendo-se uma melhor aderência de prazos de entrega combinados com clientes.					
6. Benefícios para Clientes Internos e Externos	Como os clientes internos e externos irão se beneficiar deste projeto?	<b>Internos</b> – Estações de trabalho mais organizadas, menor quantidade de defeitos nas placas, maior previsibilidade de utilização nas estações, maior previsibilidade da data de conclusão de um pedido <b>Externos</b> – Percepção de maior aderência aos prazos da Componel e satisfação do cliente.					

Continua

Continuação Tabela 2

Elemento	Descrição	Especificações
<b>7. Time de Melhoria</b>	Nome e cargo dos membros do time	Ricardo Oliveira – Engenheiro de Processos Jessyca Cristina da Costa – PCP João Eduardo Silva - Comercial
<b>8. Cronograma Básico</b>	Início	2º Trimestre 2017
	Project Charter Aprovado	3º Trimestre 2017
	Data prevista de conclusão	1º Trimestre 2018
<b>9. Suporte Necessário</b>	Quais recursos, pessoas, departamentos são necessários para o projeto?	<b>Coleta de Dados</b> – Ricardo (Processos) e Jessyca (PCP) <b>Validação do Modelo Conceitual e de Simulação</b> - Ricardo (Processos) e Jessyca (PCP) <b>Implantação de Melhorias</b> – Departamento de Produção, Departamento de PCP e Departamento Comercial

Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.2. Produtos e Processos

Nesta seção, serão apresentados a linha de produtos da Componel e o mapeamento de processos em seu sistema produtivo.

De forma geral, o circuito impresso é fabricado a partir de uma placa isolante de material laminado plástico, denominado fenolite, ou fibra de vidro. Em sua superfície há uma película de cobre de fina espessura, constituindo as trilhas condutoras da placa, por onde ocorrerá a condução de corrente elétrica pelos componentes eletrônicos.

A Componel produz atualmente quatro subtipos de placas de circuito impresso: *multilayer*, dupla face, simples face e *metal core*. Cerca de 90% de sua produção é de *multilayer*, placas de quatro camadas de maior complexidade, utilizadas na linha de montagem de grande parte de aparelhos eletrônicos atualmente. O processo produtivo dos diferentes tipos de placas é similar, com algumas etapas adicionais ocorrendo na produção da placa *multilayer*.

No mercado, encontra-se a placa de oito camadas, normalmente destinadas para smartphones. No entanto, a Componel ainda não possui capacitação tecnológica de produzir esse tipo de placa e ser fornecedora deste mercado.

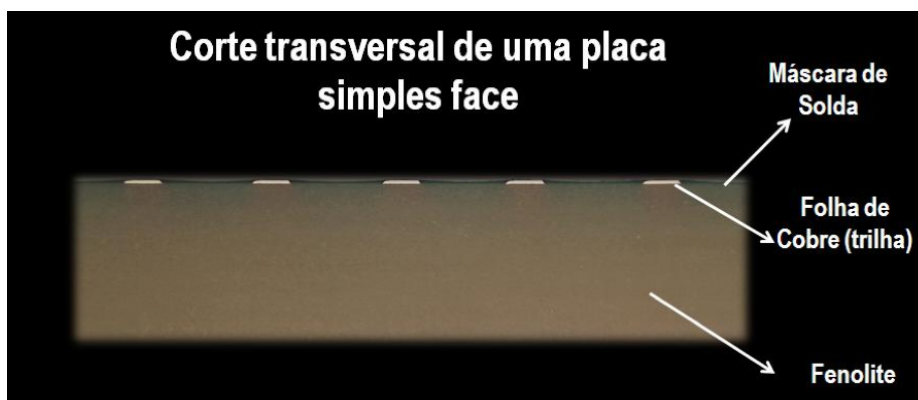
Dada a predominância da placa *multilayer* no sistema produtivo e a maior complexidade da linha de produção para esse produto, o estudo de simulação abrangerá somente essa linha. A seguir, os quatro tipos de placa serão detalhados.

#### 4.2.1. *Simples Face*

As placas simples face são produzidas utilizando como base os materiais FR1 (fenolite), um laminado plástico industrial, isolante elétrico, ou CEM1, espécie de fibra de vidro combinado com um material sintético. Uma das faces é revestida com uma folha de cobre, com espessura entre 17,5  $\mu\text{m}$  e 68  $\mu\text{m}$ .

Na figura 16 é representado o corte transversal de uma placa de simples face, ilustrando sua composição e materiais.

Figura 16 - Placa simples face

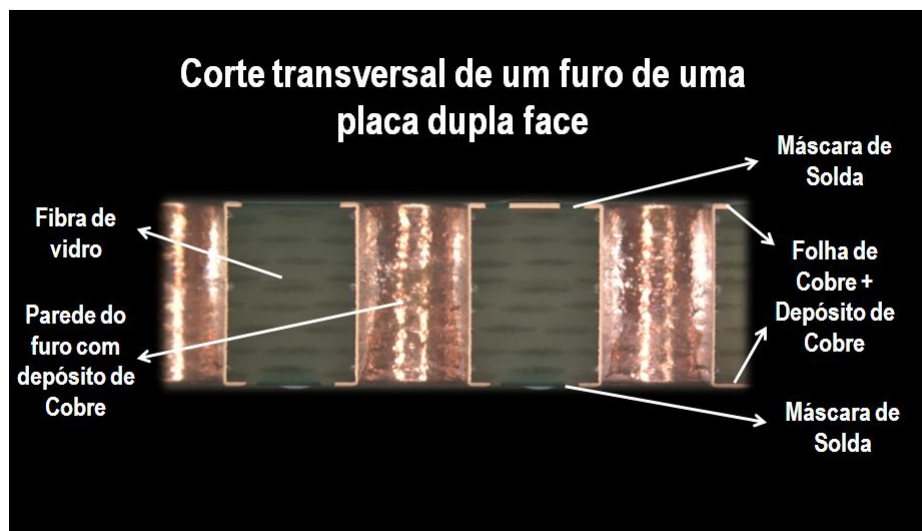


Fonte: Componel (2017)

#### 4.2.2. *Dupla Face*

A placa dupla face é produzida utilizando como base um material denominado FR4, com camadas de cobre em ambos os lados da placa, de espessura entre 17,5  $\mu\text{m}$  e 68  $\mu\text{m}$ . Este subtipo de placa é representado na figura 17.

Figura 17 - Placa dupla face



Fonte: Componel (2017)

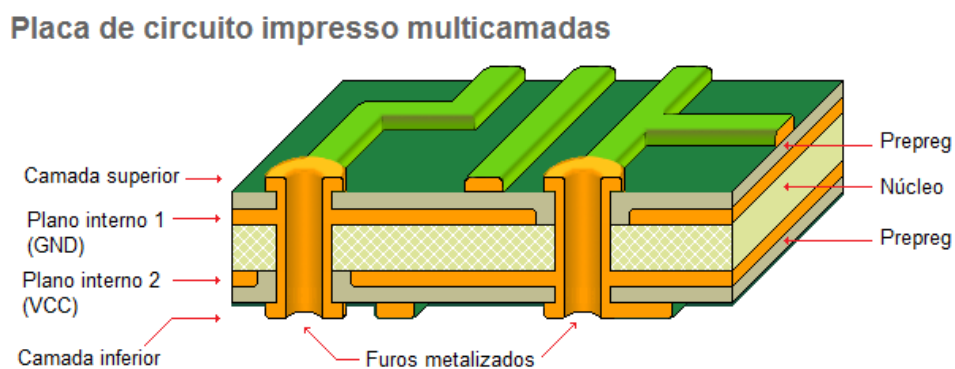


### 4.2.3. Multilayer

As placas *multilayer* são montadas a partir do laminado dupla face e diversas folhas de prepreg (*pre-impregnated*, ou pré-impregnado). O prepreg é um material composto fabricado com matriz de resina de termoplástico ou termofixo, utilizado para diversas aplicações que requerem alta rigidez e resistência aliado a um baixo peso.

A produção do *multilayer* intercala o laminado dupla face com o prepreg até se obter o número de camadas desejado. Em seguida, é colocada uma camada de cobre em cada lado e prensado o conjunto para se obter a placa multicamadas. A lamina de cobre, assim como nos produtos citados acima, possui espessura entre 17,5  $\mu\text{m}$  e 68  $\mu\text{m}$ . A figura 18 indica a composição das camadas da placa *multilayer*.

Figura 18 - Corte transversal de uma placa multilayer

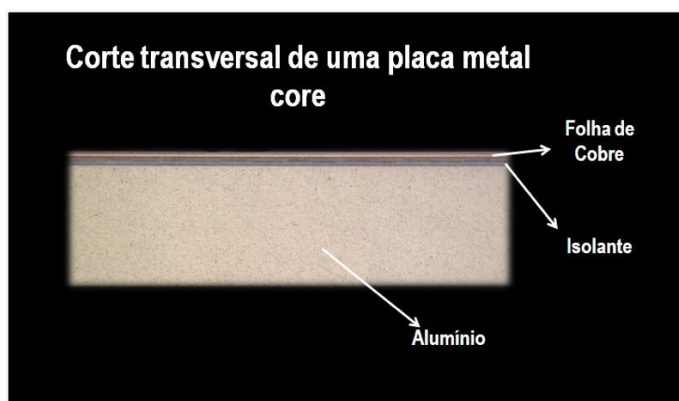


Fonte: Componel (2017)

### 4.2.4. Metal Core

As placas do tipo *Metal Core* são voltadas para utilização no mercado de iluminação, sendo utilizadas na linha de lâmpadas LED. O *Metal Core* é composto por uma camada de alumínio e uma lâmina de cobre, separados por um material isolante, como demonstrado na Figura 19.

Figura 19 - Placa *Metal Core*

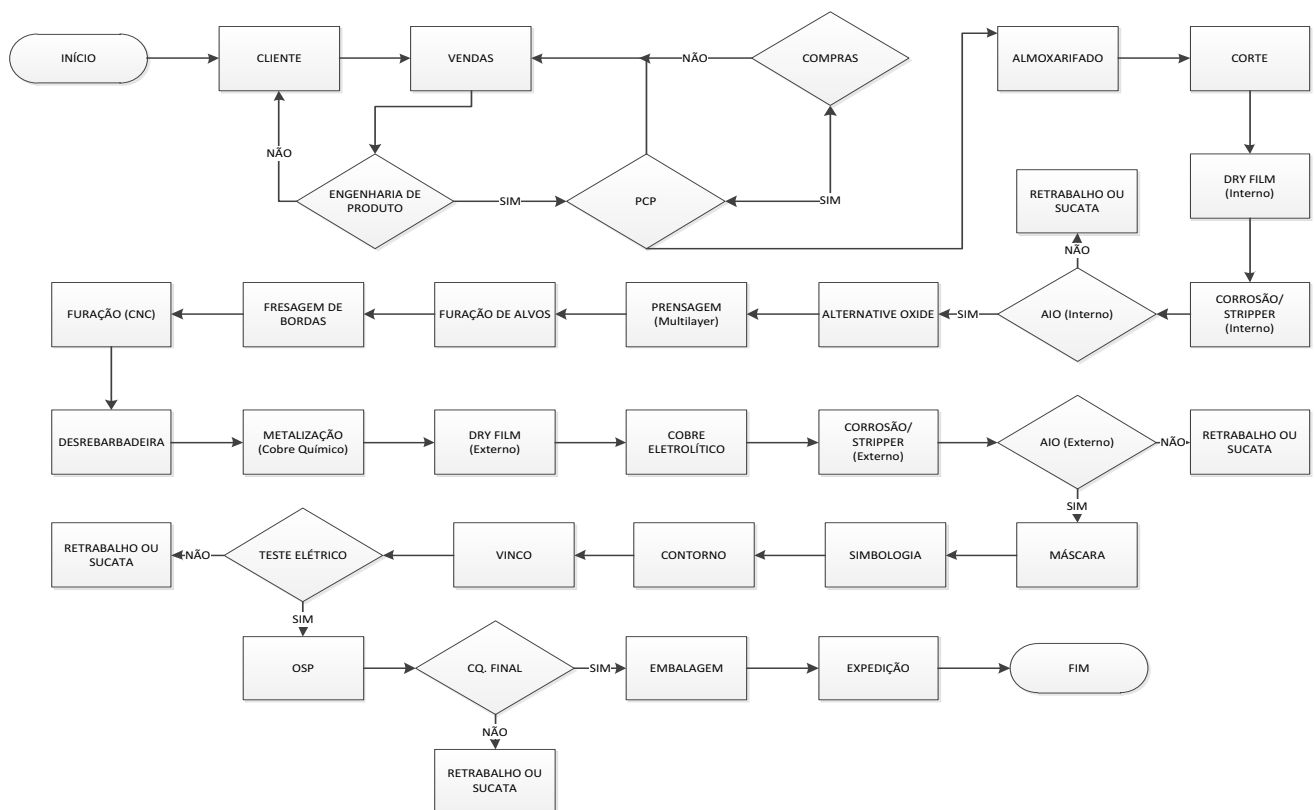


Fonte: Componel (2017)

#### 4.2.5. Mapeamento de Processos

O processo produtivo das placas de circuito impresso na Componel é extremamente complexo, com processos de transformação físicos, químicos e fotográficos, totalizando 25 etapas na fábrica, com 81 sub-processos. O fluxograma representado na figura 20 representa a totalidade destes processos produtivos, assim como o processo de entrada do pedido do cliente e planejamento das áreas fornecedoras do departamento de produção.

Figura 20 - Fluxograma dos processos da Componel



Fonte: Componel (2017)

Nota-se que todos os tipos de placas produzidas seguem um fluxo idêntico, com exceção da placa do tipo *multilayer*, que envolve uma etapa adicional de prensagem, como indicado no fluxograma. No projeto, será seguido o fluxo da placa multicamadas, foco do escopo deste trabalho de formatura, para descrever os processos envolvidos em sua produção.

O fluxograma representa o processo produtivo simulado neste trabalho, segundo a metodologia apresentada no capítulo anterior, utilizado para projetar o modelo conceitual e implementar a simulação computacional no software SIMUL8.

Cada etapa do processo será descrita a seguir. Como será notado na descrição do processo, existem dois tipos de processos quanto às suas rotas de saída:

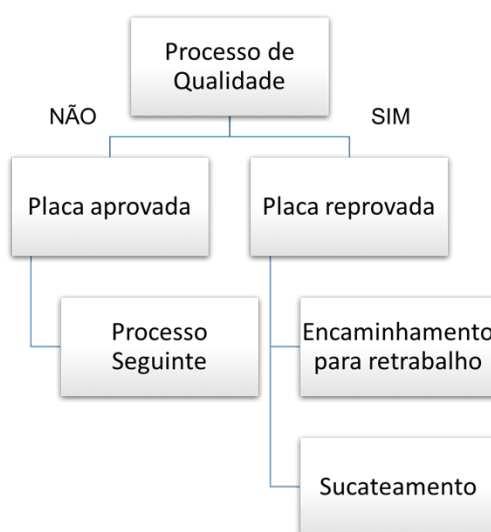
1. Processos de transformação (químico, físico ou fotográfico).

## 2. Processos de qualidade (inspeção automatizada, inspeção visual e teste elétrico).

Os processos de transformação não contam uma árvore de decisão. Todo o estoque em processo entra após o processo anterior e sai para o processo seguinte. Por outro lado, os processos de qualidade são mais complexos quanto a necessidade de ajuste de parâmetros na simulação. Há uma árvore de decisão, como ilustrado na figura 21, da qual as possíveis rotas de saída são “SIM” e “NÃO”. “SIM” representa que a placa foi aprovada no controle de qualidade, e pode prosseguir para a próxima etapa de produção. Por outro lado, “NÃO” representa a reprovação.

No caso de reprovação, a placa pode seguir dois caminhos. O primeiro é o encaminhamento do painel para retrabalho. Neste caso, operadores dedicados para retrabalho realizam essa atividade dentro da própria célula de produção na qual a placa foi inspecionada. O outro caminho é o sucateamento da placa, ocorrendo quando a placa se torna inutilizável devido aos seus defeitos.

Figura 21 - Árvore de decisão de processos



Fonte: elaborado pelo autor

Na etapa de planejamento da produção, uma ordem entra no horizonte de planejamento no momento de recebimento do pedido do cliente.

No caso de grandes clientes, como Samsung e LG, pedidos são lançados a partir de um sistema online de *Supplier Relationship Management* (SRM, ou Gestão de Relacionamento com o Fornecedor) do próprio cliente. A figura 22 representa o logotipo do sistema da Samsung. Por outro lado, o relacionamento com clientes menores é

inteiramente pessoal, ocorrendo no contato direto entre o departamento de compras do cliente e o departamento comercial da Componel.

Figura 22 - Sistema SRM Samsung



Fonte: SRM Samsung (2017)

As liberações das ordens para o chão de fábrica são controladas pelo departamento de PCP. Este departamento planeja, programa e controla as ordens de produção de acordo com a realização antecipada da previsão de demanda da fábrica. Deve-se planejar com antecedência suficiente, de forma a realizar a compra de matéria prima, além de planejar e programar a produção com uma folga de tempo adequada.

A matéria prima é, em grande parte, importada de países asiáticos. O prazo desde que o pedido de insumos é feito até o seu recebimento é de, em média, 60 dias. Cerca de 95% dos insumos para produzir placas de circuito impresso são importados, sendo que 85% são provenientes da Ásia. Dessa forma, é inviável aguardar que a demanda chegue para fazer a solicitação de matéria prima; caso isso ocorra, o prazo de entrega de oito semanas oferecido aos clientes será impraticável.

Para realizar o exercício de planejamento de demanda, os responsáveis pelas áreas comercial e de PCP da Componel consideram uma combinação dos pedidos existentes de clientes com a previsão de demanda. A previsão de demanda é extremamente dependente do departamento comercial, que mantém um contato próximo e constante com o cliente. Além do contato, o departamento comercial utiliza-se da lei do Processo Produtivo Básico (PPB), mencionada anteriormente, para realizar uma previsão da quantidade que seus clientes terão que adquirir de matéria prima nacional até o final do ano.

Uma vez liberada a ordem de produção para o chão de fábrica, iniciam-se as etapas fabris do processo. A primeira etapa consiste no envio da matéria prima, a fibra de vidro com cobre, do almoxarifado para a operação de corte. Esse corte será realizado nas medidas especificadas pela engenharia, de forma a otimizar o aproveitamento de material. As medições são feitas pelos operários que, em seguida realizam o corte nas medidas estipuladas. A sobra de material proveniente do processo de corte, aproximadamente 10% do total, é vendida como sucata. Após o término do corte, as placas são colocadas em uma máquina para a retirada de rebarbas. Após o corte, a matéria prima segue para a realização de um processo denominado *dry-film* interno, onde um filme seco será depositado nas faces da placa. O filme irá proteger as regiões de cobre que devem permanecer no laminado e que formam as trilhas condutoras de

eletricidade. Em seguida, ocorre o processo de revelação fotográfica do filme depositado sob a placa na etapa anterior. A revelação transfere a imagem do filme e deixa exposta a porção do cobre a ser corroída. Por fim, ocorre a corrosão do cobre exposto efetivamente.

A etapa seguinte é uma etapa crucial no controle da qualidade, a inspeção ótica automatizada (AOI) das camadas internas da placa *multilayer*. A máquina deste processo identifica defeitos normalmente invisíveis ao olho humano. Os defeitos podem acarretar no descarte da placa (por defeitos incorrigíveis e que afetam o funcionamento adequado) ou apenas a necessidade de retrabalhar a peça antes de prosseguir no fluxo produtivo.

No posto de trabalho onde ocorre essa inspeção há também um segundo momento pelo qual a placa *multilayer* é inspecionada, a inspeção ótica automatizada das camadas externas. Esse posto é o gargalo do processo produtivo, como será detalhado mais adiante, com uma capacidade de 671 painéis diários (Interno: 344, Externo: 327; cada painel contém em média 10 placas).

Após a inspeção ótica, a placa segue para o processo de *brown oxide*. Nessa fase, a peça será oxidada para que tenha aderência com o material de união entre as camadas do multilayer, o Prepreg. O *alternative oxide* aumenta a rugosidade do material oxidado.

Então, a placa segue para a fase de prensagem. Nesta etapa, o operador arranja as camadas de placa interna e prepreg intercaladas, com a placa interna posicionada no meio. Feito isso, ocorre a montagem dos conjuntos de painéis. O operador envolve o arranjo com folhas de cobre.

Antes de realizar a prensagem, o operador empilha 126 conjuntos montados, cada um separado do outro por uma chapa separadora. Leva-se os conjuntos para a prensa, onde através da pressão e da imposição de alta temperatura, derrete-se a resina prepreg. Ao término do processo, cada conjunto constituirá um único painel. Este processo dura aproximadamente uma hora e o resfriamento subsequente três horas.

Os processos de furação de alvos e fresagem de bordas, indicados no fluxograma inicial, não serão diretamente abordados neste estudo por serem considerados sub-processos dentro do processo da Estação de Furação. Na etapa de coleta de dados e projeto do modelo conceitual, os dois processos serão combinados com o processo de Furação CNC e considerados como um único processo.

O processo de furação é feito através de máquinas de CNC (Comando Numérico Computadorizado). Os programas base para a operação do CNC são gerados no departamento técnico e enviados para a rede. Cada máquina se comunica com a rede e executa o programa a

ela destinado. O nome programa está indicado na Ordem de Produção, para conferência do operador.

Realizados os furos, os mesmos são metalizados para que haja conexão elétrica entre ambos os lados da placa. Para tal, os painéis são colocados em um processo de banho químico de cobre. Assim, deposita-se uma fina camada de cobre sob a superfície interna dos furos.

Finalizado o banho químico, a placa é encaminhada para o posto de *dry-film*, onde realiza-se a aplicação de novo filme, desta vez sob suas superfícies externas. Em seguida, ocorre a corrosão das camadas externas da placa. Isso permite a formação das trilhas condutoras de eletricidade nas faces superior e inferior.

A placa, então, retorna para a estação de inspeção ótica automatizada (AOI) para a inspeção de qualidade de suas camadas externas. Caso a peça seja aprovada, realiza-se um processo de polimento da superfície para melhor aderência da tinta que será em seguida aplicada. Combina-se a tinta com solvente para fazer a mistura e leva-se a peça para a revelação da máscara. Revela-se então a máscara e aplica-se tinta na placa por completo, esperando secar, mas não a curando.

Antes de curá-la, deve-se retirar a tinta que foi aplicada sobre o cobre. Essa tinta será facilmente removida devido à revelação que protegeu o cobre de sua aderência, evitando que a luz atingisse áreas específicas em que o cobre deveria ficar aparente. Após a exposição dos pontos específicos do cobre, cura-se a tinta e repete-se o processo para o lado oposto. O propósito de aplicação da tinta é para impedir a ocorrência de curtos pois, quando o cliente aplicar a pasta de solda na placa para unir os diversos componentes, a pasta de solda irá aderir somente onde não há tinta.

Em seguida, ocorre a etapa de simbologia. Esse processo demarca a simbologia sob a placa, de acordo com a especificação do cliente. A simbologia indica onde cada tipo de componente deve ser posicionado no momento de montagem dos componentes sob a placa na linha de produção do cliente.

Finalmente, o painel retorna à estação de CNC, para que seja separado em placas individuais. Em seguida, as placas passarão por testes elétricos em máquinas especializadas. O teste elétrico serve para testar os circuitos elétricos da placa, identificando placas defeituosas com curtos-circuitos ou trilhas abertas. No caso de curto-circuito, a placa pode ser retrabalhada para reestabelecer a conexão elétrica da forma correta. Por outro lado, defeitos de trilha aberta acarretam um descarte imediato da placa, encaminhada para sucateamento.

Por fim, aplica-se uma camada de verniz sobre a placa (etapa denominada OSP no fluxograma) e realiza-se um controle de qualidade final. Um último retrabalho pode ser

necessário no controle de qualidade final, antes de a placa ser encaminhada para a embalagem. Termina-se o processo produtivo com a embalagem das placas em caixas e a sua expedição para o cliente final.

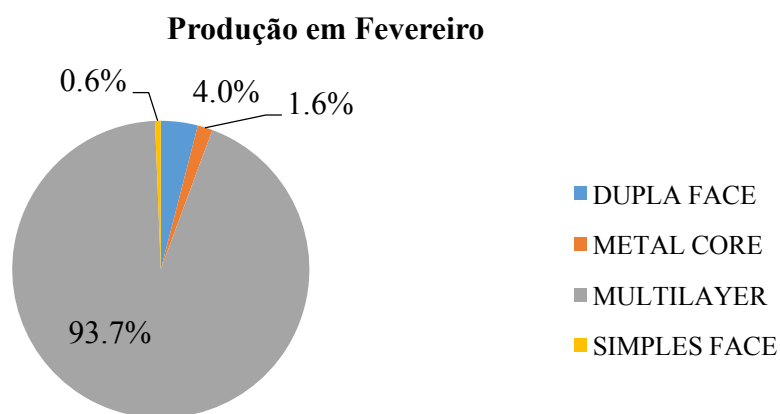
#### 4.3. Coleta de Dados

Primeiramente, para se coletar os dados para um estudo de simulação, deve-se definir o escopo do que a simulação irá conter. O projeto envolveu a simulação dos processos produtivos da Componel nos meses de fevereiro e março de 2017, no qual ocorreu elevada demanda, acarretando em um alto lead time e dificuldade no cumprimento de prazos propostos aos clientes.

Portanto, o escopo da simulação abrange um período de oito semanas de produção, com a fábrica operando sob uma situação real crítica. Com esse escopo em mente, espera-se, primeiramente, obter um modelo que seja validável através de uma comparação com dados reais. Em segundo lugar, visa-se, em um segundo momento do projeto, utilizar a simulação para o teste de alternativas no planejamento e controle de produção, propondo ações que contemplariam melhorias no sistema operando com um alto volume de entradas.

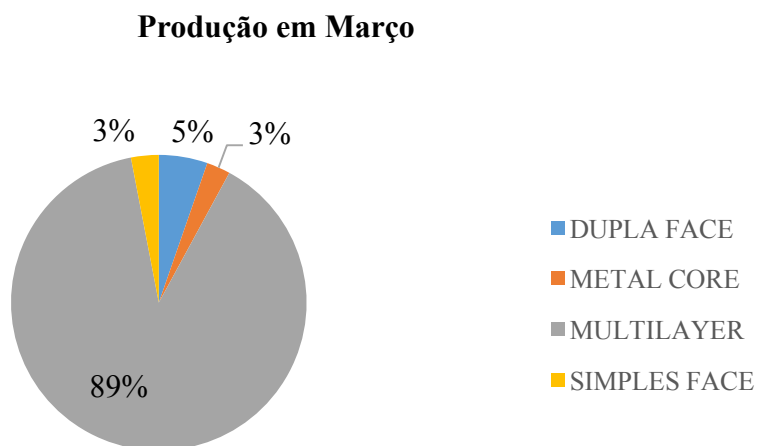
Os gráficos representados nas figuras 23 e 24 mostram que o tipo de placa com maior *share* de produção é a placa *multilayer*, nos meses em questão no estudo. Esse tipo de placa será o único considerado para o estudo de simulação.

Figura 23– Produção total de fevereiro por tipo de placa



Fonte: Componel (2017)

Figura 24 - Produção total de março por tipo de placa



Fonte: Componel (2017)

O projeto do modelo conceitual e a subsequente construção da simulação no software Simul8 abrange os parâmetros críticos de entrada listadas na Tabela 3, bem como os parâmetros de entrada que não serão necessários ao modelo.

Tabela 3 - Parâmetros críticos e não-críticos de entrada da simulação

Parâmetro	Descrição	Crítico?	Justificativa
Entidades	Quantidade de painéis de circuito impresso na entrada do sistema	Sim	A entrada de entidades no ponto de início do modelo é crucial para simular a situação real da fábrica
Tempos de Ciclo	O tempo de se processar um painel em cada etapa de produção	Sim	A distribuição de probabilidade de tempo de ciclo é crucial para se obter uma simulação realista da fábrica
Tempo de Movimentação	O tempo de movimentação do lote de uma etapa produtiva à etapa seguinte.	Sim	As distâncias percorridas pelos lotes no chão de fábrica impactam significativamente no lead time total

Continua



Continuação da Tabela 3

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>	<b>Crítico?</b>	<b>Justificativa</b>
Tempos de Setup e Paradas	O tempo de setup de maquinário e tempos de paradas (manutenções, almoço, intervalos curtos)	Sim	Ambos os tempos impactam na produtividade do processo, acarretando em um efeito no lead time final.
Operador	Quantidade de operadores em cada célula de produção do processo produtivo	Sim	Os recursos disponíveis em cada estação determinam a disponibilidade imediata de se processar uma entidade
Turnos	Quantidade de turnos e tempo de cada turno em cada célula de produção do processo produtivo	Sim	As atividades da simulação operam de acordo com os turnos no qual os seus recursos dedicados estão disponíveis
Qualidade	Porcentagem de estoque em processo que é encaminhado para retrabalho ou sucateamento nas etapas de controle de qualidade	Sim	Define o estoque em processo perdido ao longo do processo ou gera um atraso na entrega de um pedido devido à placas retrabalhadas
Máquinas	Quantidade de máquinas em cada célula de produção do processo produtivo	Sim	A quantidade de máquinas em cada processo dita a capacidade da célula de produção
Custo	Envolve custo por entidade, custo de recursos, custo de máquinas	Não	O projeto não possui a análise financeira como foco de estudo, apenas o planejamento e controle da produção

Obteve-se, junto ao Engenheiro de Processos e a responsável pelo PCP da Componel, dados sobre os parâmetros de entrada necessários ao modelo de simulação.

Como mencionado no capítulo 3, há indicadores de saída que precisam ser quantificados na situação real, para validação do modelo computacional. São eles: WIP médio no sistema, vazão (*throughput*) e tempos e tamanhos médio de filas, especialmente no gargalo.

Após a identificação dos parâmetros de entrada e indicadores de desempenho relevantes, partiu-se para a coleta em campo desses dados. Esta seção está dividida de acordo com os indicadores de entrada e saída do modelo, apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Dados coletados para o projeto

<b>Tipo</b>	<b>Indicador</b>
<b>Entrada</b>	Entrada de Entidades, Tempos de Ciclo, Tempos de Movimentação, Quantidade de Operadores, Turnos, Máquinas e Índices de Qualidade
<b>Saída</b>	Lead Time Produtivo médio, Vazão, Tempo e tamanho médio de filas

#### **4.3.1. Liberação de Ordens de Produção**

A chegada de entidades, na situação real da fábrica, pode ser traduzida pela quantidade de pedidos de clientes convertidos em ordens de produção (OPs) programadas para liberação na fábrica dentro do planejamento dos meses estabelecido no escopo (fevereiro e março de 2017).

Os dados de ordens de produção liberadas, dia-a-dia, foram coletadas com a responsável pelo PCP da fábrica. A tabela 5 representa uma porção da planilha com dados de liberação de OPs da placa tipo *multilayer*, em cada dia do mês de fevereiro e março.

Tabela 5 - Liberação de Ordens de Produção (OPs)

<b>Data de Liberação</b>	<b>OP</b>	<b>Quantidade de Painéis</b>
01-Feb	12176/0	126
01-Feb	12177/0	126
01-Feb	12178/0	126
01-Feb	12179/0	126
01-Feb	12180/0	126
01-Feb	12181/0	126
01-Feb	12182/0	126
01-Feb	12183/0	63
02-Feb	12184/0	126
02-Feb	12185/0	126
02-Feb	12186/0	126
02-Feb	12187/0	126
02-Feb	12188/0	126
02-Feb	12189/0	126
02-Feb	12190/0	126
02-Feb	12191/0	63

Fonte: Componel (2017)

Diariamente, eram liberados 945 painéis, cada painel com dez placas em média. Assim, ao longo do mês de fevereiro, foram liberados 18900 painéis, ou cerca de 189 mil placas. É importante sinalizar que um lote consiste em um conjunto de 126 painéis. Dessa forma, 7,5 lotes são liberados diariamente.

#### ***4.3.2. Tempos de Ciclo***

Os tempos de ciclo, como indicado no capítulo de metodologia, foram medidos por cronometragem diretamente no chão de fábrica. A amostra de cinquenta tempos foi coletada para os processos com tempo de ciclo mais curto, abaixo de quatro minutos, dada a limitação de tempo para coleta de dados do projeto.

Os processos com tempo de ciclo mais longo, como prensagem, possuem tempo de ciclo com menos variações, dada sua natureza automatizada. Para esses processos, foi considerado um tempo de ciclo fixo, coletado anteriormente pelo Engenheiro de Processo da Componel (coleta de um único tempo de ciclo ou média de três amostras). Outros processos mais curtos, mas com comportamento automatizado e independente das características dos painéis, também foram considerados fixos. Um exemplo é a etapa de Cobre Eletrolítico (ou Cobre II Ludy).

Além dos tempos de ciclo, foi coletada a quantidade de painéis processados por ciclo em cada etapa. Esse dado será incorporado posteriormente na implementação do modelo computacional, para se obter uma representação realista da capacidade de processamento por ciclo de cada processo.

A tabela 6 apresenta os tempos de ciclo médio e quantidade de painéis por ciclo, para cada processo. Os tempos de embalagem e expedição não foram coletados, dado que são atividades mais esporádicas, e o autor não esteve presente na fábrica quando tais processos ocorriam. Ademais, segundo o Engenheiro de Processos da Componel, o tempo de ciclo destas duas atividades é curto, tendo mínimo impacto no lead time produtivo total.

Tabela 6 - Distribuições estatísticas de tempo de ciclo para cada operação

Operação	Distribuição	Parâmetros (min)			Painéis por Ciclo
		Média	Desvio Padrão	Limite Inferior (Limite Superior)	
1-Corte	Normal	3,03	0,136	-	20
2-Dry Film Interno	Normal	0,62	0,06	-	1
3-StripperCorrosão Interno	Log Normal	0.0894	0.0382	0,334	1
4-AOI Interno	Normal	1,8	0,12	-	1
5-Brown Oxide	Normal	0,46	0,03	-	1
6-Prensagem (Quente)	Fixa	88	-	-	126
7 - Prensagem (Frio)	Fixa	90	-	-	378
7-Furação	<i>Average</i>	183	45,75	-	18
8-Rebarbadeira	Uniforme	-	-	0,19 (0,26)	1
9-Metalização	<i>Average</i>	14	3,5	-	22
10-Dry Film Externo	Normal	1,17	0,22	-	1
11- Cobre II Ludy	Fixa	6	-	-	6
12-Stripper Corrosão Externo	Log Normal	0,0616	0,0535	0,507	1
13-AOI Externo	Normal	2,32	0,168	-	1
14-Máscara de Solda	Normal	0,88	0,12	-	1
15-Simbologia	Fixa	0,3	-	-	1
16-Contorno CNC	<i>Average</i>	45	11,25	-	30
17-Teste Elétrico	Normal	0,98	0,2	-	1
18-OSP	Uniforme	-	-	0,27 (0,37)	1
19-CQ Final	Uniforme			0,17 (0,25)	1
20-Embalagem	-	-	-	-	12
21-Expedição	-	-	-	-	17

#### 4.3.3. Tempos de Movimentação

Os tempos de movimentação entre etapas é um fator que tem impacto no lead time total, e deve ser considerado no modelo. É importante frisar que a movimentação na fábrica é feita inteiramente de forma manual, ou seja, com operadores movimentando os lotes de painéis em carrinhos. O tempo de movimentação foi mensurado por meio de cronometragem de um operador movimentando lotes produtivos entre uma etapa de produção e a etapa seguinte.

Ademais, a movimentação é feita quando o operador conclui um lote em sua estação de trabalho. O mesmo operador é encarregado de movimentar o lote para a etapa seguinte, incorrendo em perdas de produtividade. A Tabela 7 apresenta os tempos de movimentação de uma etapa para a etapa seguinte. O tempo indicado na linha de Corte, por exemplo, representa a quantidade de tempo, em minutos, de se movimentar um lote da estação de Corte para a estação de *Dry Film* Interno.

Tabela 7 - Tempos de movimentação

Operação	Tempo de Movimentação para próxima etapa (min/lote)
1-Corte	1
2-Dry Film Interno	0,5
3-StripperCorrosão Interno	1
4-AOI Interno	1
5-Brown Oxide	0,25
6-Prensagem	0,08
7-Furação	0,67
8-Rebarbadeira	2
9-Metalização	0,5
10-Dry Film Externo	0,5
11- Cobre II Ludy	0,5
12-Stripper Corrosão Externo	1
13-AOI Externo	0,33
14-Máscara de Solda	0,33
15-Simbologia	2
16-Contorno CNC	2
17-Teste Elétrico	0,25
18-OSP	2
19-CQ Final	0,17
20-Embalagem	0,17
21-Expedição	-

#### 4.3.4. Tempo de Setup e Paradas

O tempo de setup e as paradas para refeições representam perdas de eficiência do sistema, que devem ser considerados no momento de implementação do modelo computacional. A partir desses dados, será possível ajustar a disponibilidade de recursos e a eficiência produtiva dos processos, refletindo o processo produtivo real da placa *multilayer*. A tabela 8 traz os dados referentes aos tempos de setup para cada processo.

Tabela 8 - Tempos de set-up por operação

<b>Operação</b>	<b>Tempo de Set-up (min/dia)</b>	<b>Frequencia de Set-Up</b>
1-Corte	20	Ao iniciar o turno
2-Dry Film Interno	60	Ao iniciar o turno
3-StripperCorrosão Interno	30	Ao iniciar o turno
4-AOI Interno	7	Ao iniciar o turno
5-Brown Oxide	20	Ao iniciar o turno
6-Prensagem	20	2,51 minutos a cada lote
7-Furação	40	A cada lote são perdidos 40 minutos de set-up porém o PCP elabora um planejamento para minimizar o numero de set-up para apenas 1/ dia
8-Rebarbadeira	60	Ao iniciar o turno
9-Metalização	136	Ao iniciar o turno
10-Dry Film Externo	60	Ao iniciar o turno
11- Cobre II Ludy	25	Ao iniciar o turno
12-Stripper Corrosão Externo	30	Ao iniciar o turno
13-AOI Externo	15	Ao iniciar o turno
14-Máscara de Solda	400	1 set-up /lote de 57 min cada (7 lotes/dia)
15-Simbologia	240	1 set-up por lote de 34:17 min cada (7 lotes/dia)
16-Contorno CNC	240	1 set-up por lote de 34:17 min cada (7 lotes/dia)
17-Teste Elétrico	120	1 set-up por lote de 17:09 min cada (7 lotes/dia)
18-OSP	120	Ao iniciar o turno
19-CQ Final	30	Ao iniciar o turno
20-Embalagem	30	Ao iniciar o turno
21-Expedição	20	Ao iniciar o turno

A tabela 9 indica os tempos de parada para refeição por processo. Durante esse período indicado, a estação de trabalho para inteiramente, e os operadores se encontram em um estado não-produtivo.

Tabela 9 - Tempos de parada por operação

<b>Operação</b>	<b>Tempo de paradas (refeição)/dia</b>	<b>Frequencia de Paradas/dia</b>
1-Corte	1:00:00 Horas	1,0
2-Dry Film Interno	1:00:00 Horas	1,5
3-StripperCorrosão Interno	1:00:00 Horas	1,5
4-AOI Interno	1:00:00 Horas	1,5

Continua

Continuação da Tabela 9

<b>Operação</b>	<b>Tempo de paradas (refeição)/dia</b>	<b>Frequencia de Paradas/dia</b>
5-Brown Oxide	1:00:00 Horas	1,0
6-Prensagem	1:00:00 Horas	1,0
7-Furação	2:00:00 Horas	2,0
8-Rebarbadeira	1:00:00 Horas	1,0
9-Metalização	1:00:00 Horas	2,0
10-Dry Film Externo	1:00:00 Horas	1,5
11- Cobre II Ludy	2:00:00 Horas	3,0
12-Stripper Corrosão Externo	1:00:00 Horas	1,5
13-AOI Externo	1:30:00 Horas	1,5
14-Máscara de Solda	2:00:00 Horas	3,0
15-Simbologia	1:00:00 Horas	2,0
16-Contorno CNC	2:00:00 Horas	2,0
17-Teste Elétrico	2:00:00 Horas	3,0
18-OSP	1:00:00 Horas	1,0
19-CQ Final	1:00:00 Horas	1,0
20-Embalagem	1:00:00 Horas	1,0
21-Expedição	1:00:00 Horas	1,0

Nota-se que determinadas operações indicam uma frequência de parada por dia com valor 1,5. Isso ocorre pois a estação onde ocorre a operação é compartilhada entre as operações de interno e externo. A programação de turnos das estações de trabalho será aprofundada na seção seguinte.

#### **4.3.5. Operadores e Turnos**

A quantidade de operadores disponíveis em cada célula de produção é um dado que a empresa possui fácil controle e acompanhamento. No controle interno da empresa, consiste na planilha de *headcount*.

Por sua vez, a informação a respeito dos turnos consiste nos turnos em que cada etapa opera, tanto em período do dia (manhã, tarde e noite), quanto em quantidade de horas. Esses dados foram coletados com os responsáveis pelo PCP e pela Engenharia de Processos da Componel. Construir um modelo que simule o processo produtivo o mais próximo possível à situação real depende de ajustar cada etapa de produção para operar conforme os turnos programados no mundo real.

A distribuição de turnos é definida de acordo com a capacidade dos processos. Processos com menor capacidade costumam operar sob regimes de dois ou três turnos, para conseguir atender a demanda. Processos com tempos de ciclo menores operam em um turno, em horário

comercial. A tabela 10 indica a programação de turnos em cada etapa do processo, a quantidade total de operadores e o tempo trabalhado (horas/dia).

Tabela 10 - Turnos e recursos em cada etapa

<b>Operação</b>	<b>H. Count Total</b>	<b>Qtd. Turnos</b>	<b>Tempo Trabalhado (Horas/Dia)</b>
1-Corte	1	1	09:30:00
2-Dry Film Interno	6	1,5	12:00:00
3-StripperCorrosão Interno	6	1,5	12:00:00
4-AOI Interno	9	1,5	12:00:00
5-Brown Oxide	1	1	09:30:00
6-Prensagem	3	1	09:30:00
7-Furação	7	2	23:59:59
8-Rebarbadeira	1	1	09:30:00
9-Metalização	4	2	16:00:00
10-Dry Film Externo	6	1,5	12:00:00
11- Cobre II Ludy	3	3	23:59:59
12-Stripper Corrosão Externo	6	1,5	12:00:00
13-AOI Externo	9	1,5	12:00:00
14-Máscara de Solda	17	3	23:59:59
15-Simbologia	2	2	16:00:00
16-Contorno CNC	6	2	23:59:59
17-Teste Elétrico	8	3	23:59:59
18-OSP	1	1	09:30:00
19-CQ Final	5	1	09:30:00
20-Embalagem	2	1	09:30:00
21-Expedição	3	1	09:30:00

Como pode ser observado na quantidade de turnos e tempo trabalhado, os processos se comportam de forma diferente. Os processos podem ser divididos de acordo com a característica de seus turnos. A tabela 11 traz essa divisão e fornece um maior contexto sobre o comportamento dos turnos. Essa informação é importante para programar o funcionamento de cada etapa na implementação do modelo computacional.



Tabela 11 - Relação de turnos e processos

<b>Relação de Turnos e Processos</b>	
<b>1 Turno (07:30 às 17:00)</b>	1 - Corte 5 - Brown Oxide 6 - Prensagem 8 - Rebarbadeira 18 - OSP 19 - CQ Final 20 - Embalagem 21 - Expedição
<b>2 Turnos de 12 horas cada com 4 equipes se revezando – Este modelo opera 24/7</b>	7 - Furação 16- Contorno CNC
<b>2 Turnos de 8 horas cada (06:00 às 14:00 e 14:00 às 22:00)</b>	Simbologia Metalização
<b>3 Turnos (06:00 – 14:00, 14:00 às 22:00, 22:00 às 06:00)</b>	2 II Ludy Máscara de Solda Teste Elétrico
<b>3 Turnos, porém divide sua capacidade com o processo equivalente de Interno/Externo</b>	2- Dry Film Interno 3 – Stripper Corrosão Interno 4 – AOI Interno 10 – Dry Film Externo 12 – Stripper Corrosão Externo 13 – AOI Externo

As estações de Dry Film, Corrosão e AOI dividem suas capacidades entre processos de transformação das camadas internas e externas do painel. O turno intermediário divide sua capacidade entre interno e externo. Dessa forma, cada processo opera efetivamente sob um turno de doze horas. Pode-se considerar que os processos de interno operam das 06:00 às 18:00, enquanto os processos de externo operam no período noturno, das 18:00 às 6:00.

Nos processos que operam em mais de um turno, a quantidade total de operadores é dividida. Além disso, os processos que envolvem inspeções de qualidade têm operadores dedicados ao retrabalho de painéis reprovados. A tabela 12 indica essa divisão e a quantidade de recursos dedicados para o retrabalho.

Tabela 12 - Distribuição de operadores

<b>Operação</b>	<b>Qtd. Operadores Total</b>	<b>Qtd. Operadores por Turno</b>	<b>Operadores para Retrabalho por Turno</b>
1-Corte	1	1	
2-Dry Film Interno	6	6	
3-StripperCorrosão Interno	6	4	
4-AOI Interno	9	9	3
5-Brown Oxide	1	1	
6-Prensagem	3	3	
7-Furação	7	3 (+1 em horário administrativo 07:30 às 17:00)	
8-Rebarbadeira	1	1	
9-Metalização	4	2	
10-Dry Film Externo	6	6	
11- Cobre II Ludy	3	1	
12-Stripper Corrosão Externo	6	5	
13-AOI Externo	9	9	3
14-Máscara de Solda	17	7 (3 no turno das 22:00 às 06:00)	1
15-Simbologia	2	1	
16-Contorno CNC	6	3	
17-Teste Elétrico	8	3 (2 no turno das 22:00 às 06:00)	1
18-OSP	1	1	
19-CQ Final	5	5	3 (Em um único turno de 10h)
20-Embalagem	2	2	
21-Expedição	3	3	

Determinados processos operam aos sábados também. Os processos que possuem apenas um turno, como o Corte e a Prensagem, são os únicos que não operam aos sábados. Por questões

jurídicas, os turnos de sábado ocorrem de maneira alternada. O primeiro turno opera em um sábado, das 06:00 às 14:00. No sábado seguinte, o outro turno opera das 09:00 às 17:00.

#### **4.3.6. Máquinas e Equipamentos**

A quantidade de máquinas impacta diretamente na capacidade de cada célula de produção. Um processo com mais máquinas possui um tempo médio de espera em fila menor do que um processo com apenas uma máquina, desde que a relação entre tempos de ciclo dos dois processos seja proporcional ao número de máquinas. Dessa forma, a relação entre ambas as variáveis é inversamente proporcional.

A tabela 13 indica a relação de processos e quantidade de máquinas. Esses dados serão considerados na implementação do modelo computacional.

Tabela 13 - Quantidade de máquinas por etapa

<b>Operação</b>	<b>Qtd. de Máquinas</b>
1-Corte	1
2-Dry Film Interno	1
3-StripperCorrosão Interno	1
4-AOI Interno	2
5-Brown Oxide	1
6-Prensagem (Quente)	1
7 - Prensagem (Frio)	1
7-Furação	7
8-Rebarbadeira	1
9-Metalização	1
10-Dry Film Externo	1
11- Cobre II Ludy	1
12-Stripper Corrosão Externo	1
13-AOI Externo	2
14-Máscara de Solda	3
15-Simbologia	1
16-Contorno CNC	2
17-Teste Elétrico	1
18-OSP	1
19-CQ Final	3
20-Embalagem	1
21-Expedição	1

#### **4.3.7. Índices de Qualidade**

Nas etapas onde ocorrem inspeções de qualidade nos painéis, há uma porcentagem de painéis que é aprovada, seguindo para o próximo processo, uma porcentagem encaminhada para retrabalho e uma porcentagem encaminhada para sucateamento. Os índices de qualidade,

*Yield* e *First Pass Yield* (FPY), foram coletados na Componel. O FPY indica a porcentagem de placas aprovadas na primeira passagem pela inspeção, enquanto o *Yield* indica a porcentagem final de placas aprovadas.

A porcentagem final de painéis sucateados e retrabalhados podem ser calculados pelas seguintes fórmulas:

$$\% \text{ Sucata}_p = \left( 1 - \left( \frac{FPY_p}{100} \right) \right) * 100$$

$$\% \text{ Retrabalho}_p = \text{Yield}_p - FPY_p$$

A tabela 14 apresenta esses índices calculados para os processos que envolvem decisões de qualidade. Os processos que não envolvem decisões de qualidade possuem FPY e *Yield* de 100%, sendo omitidos desta tabela.

Tabela 14 - Índices de qualidade

Operação (p)	FPY	Yield	% Sucata	%Retrabalho
4-AOI Interno	91,23%	99,50%	0,50%	8,27%
13-AOI Externo	55,40%	97,00%	3,00%	41,60%
14-Máscara de Solda	99,82%	99,95%	0,05%	0,13%
17-Teste Elétrico	90,77%	98,70%	1,30%	7,93%
19-CQ Final	98,50%	99,85%	0,15%	1,35%

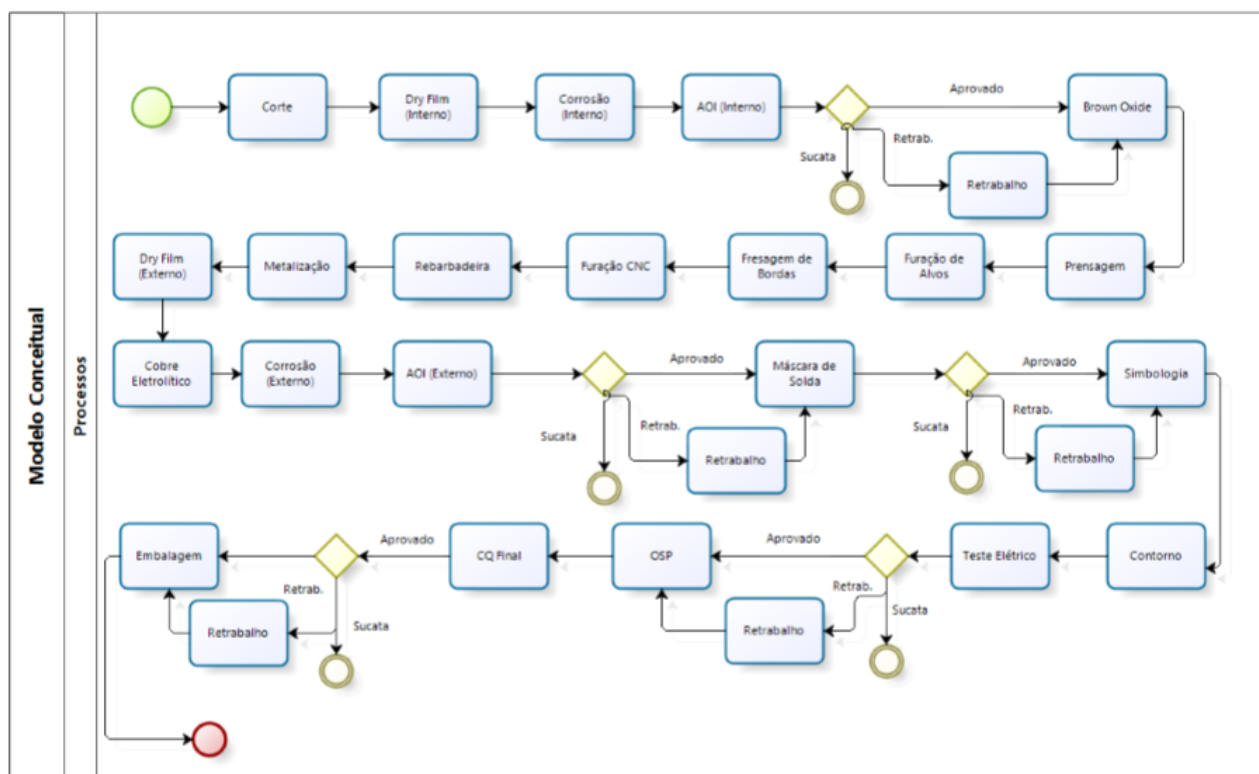
#### 4.4. Projeto e Validação do Modelo Conceitual

Dado o fluxograma e os processos descritos acima, utilizou-se o software Bizagi *Process Modeler* para projetar o modelo conceitual. Este modelo apresenta os processos que serão simulados, o fluxo de produção e os pontos de decisão do processo produtivo. Além disso, representa-se, à parte, as informações e recursos relacionados aos processos, que determinarão os KPIs de saída do modelo.

Ressalta-se que as etapas de coleta de dados e de projeto do modelo conceitual ocorrem de forma quase simultânea, dialogando entre si, como indicado na metodologia do projeto.

A figura 25 representa os processos do modelo conceitual, segundo a notação apresentada no capítulo de metodologia.

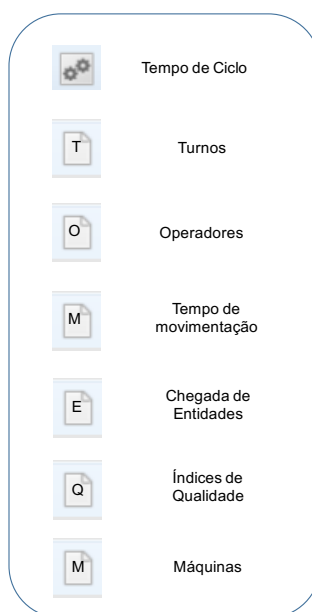
Figura 25 - Modelo conceitual (processos)



Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso, identificou-se as informações e recursos que alimentam os processos e ditam o desempenho do sistema, como já detalhado na etapa de coleta de dados. A figura 26 indica as informações e recursos relevantes para o modelo conceitual e modelo de simulação.

Figura 26 - Informações e recursos para o modelo



Fonte: Elaborada pelo autor

Para validação do projeto do modelo conceitual, foi utilizado a experiência do Engenheiro de Processo da Componel. O modelo conceitual foi documentado e transmitido e *feedback* foi coletado.

Na primeira avaliação do modelo conceitual foi indicado que os processos de furação de alvos e fresagem de bordas estavam incluídos nos tempos de ciclo coletados do processo de furação. Os três são realizados na mesma célula de produção, utilizando os mesmos recursos. O modelo foi simplificado, com a retirada desses dois processos, visto que seu impacto no modelo computacional não seria relevante.

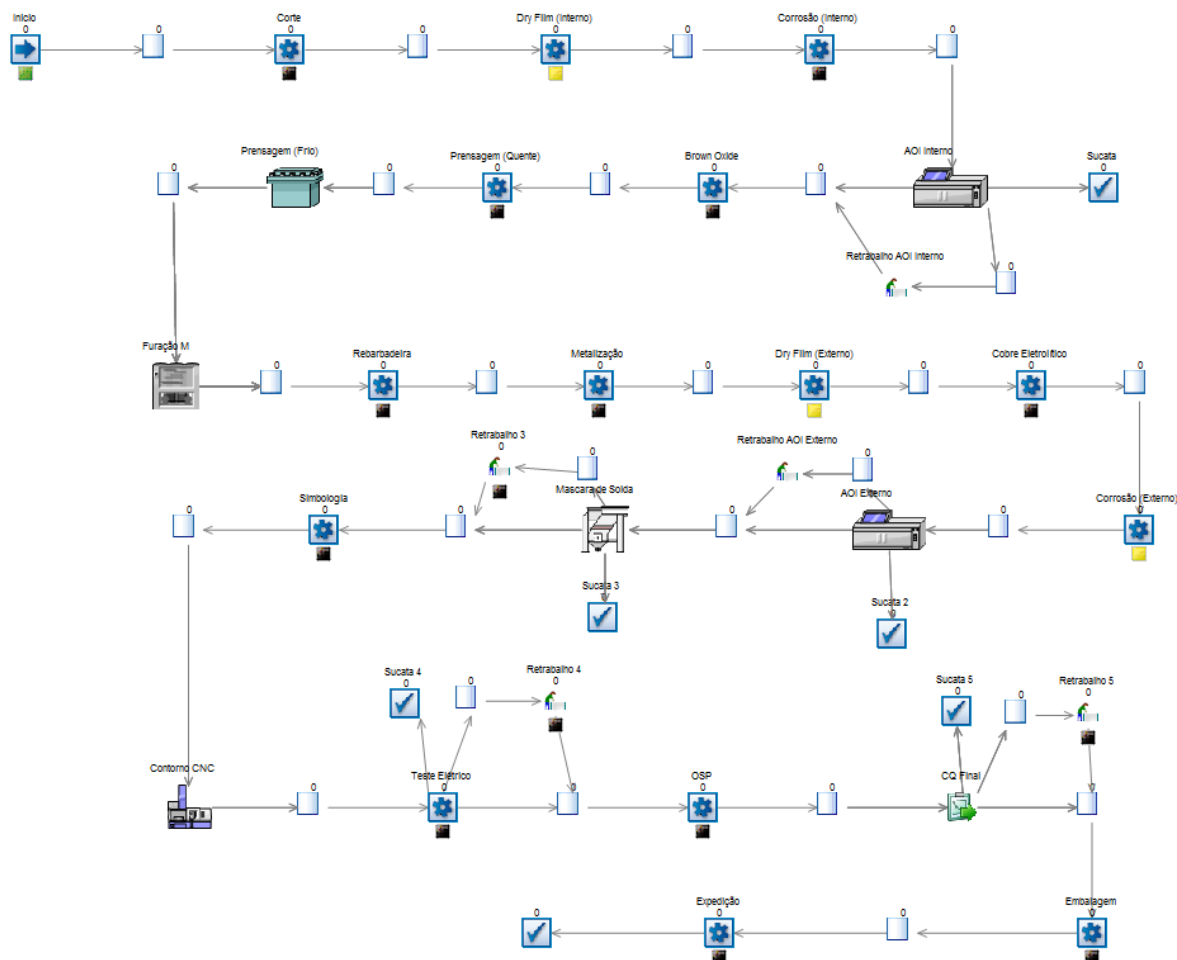
#### **4.5. Implementação do Modelo Computacional**

Finalizadas as etapas de coleta de dados e validação do modelo conceitual, em parceria com a Componel, seguiu-se para a implementação do modelo computacional, onde o autor utilizou seus conhecimentos de *softwares* de simulação de eventos discretos. Como mencionado anteriormente, o *software* escolhido para o desenvolvimento desta etapa do projeto foi o Simul8.

A implementação do modelo computacional envolveu, primeiramente, desenhar o fluxo de produção com os blocos apresentados na metodologia. Em seguida, programou-se os dados de entrada relevantes para o modelo, utilizando-se os dados reais coletados presencialmente na Componel.

Os tempos de ciclo coletados na Componel foram utilizados para determinar as curvas estatísticas, com o auxílio do software Stat:Fit apresentado na metodologia. Tais curvas estatísticas foram utilizadas como parâmetros de entrada em cada processo para determinar a distribuição estatística de seu tempo de duração. Outros parâmetros de entrada, como recursos, turnos, tempos de setup e tempos de parada também foram programados no modelo. A interface visual do modelo de simulação pode ser vista na figura 27.

Figura 27 - Modelo de simulação da fábrica Componel (Simul8)



Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.6. Verificação do Modelo Computacional

A etapa de verificação do modelo conceitual é necessária para confirmar a tradução correta do modelo conceitual para o modelo computacional. Através desse processo, visa-se verificar o modelo quanto ao seu comportamento esperado e encontrar erros em sua construção. Primeiramente, verificou-se a aderência da sequência lógica dos processos programados ao fluxo de produção real (previamente representado no modelo conceitual). Em um segundo momento, a verificação consistiu em executar o modelo de simulação com diferentes parâmetros de chegada de entidades, não necessariamente idênticos ao que ocorreu nos meses de fevereiro e março de 2017 na fábrica da Componel. Constatou-se que em todos os casos, o sistema se comportou da forma esperada, inclusive em casos extremos. Estes comportamentos são detalhados a seguir.

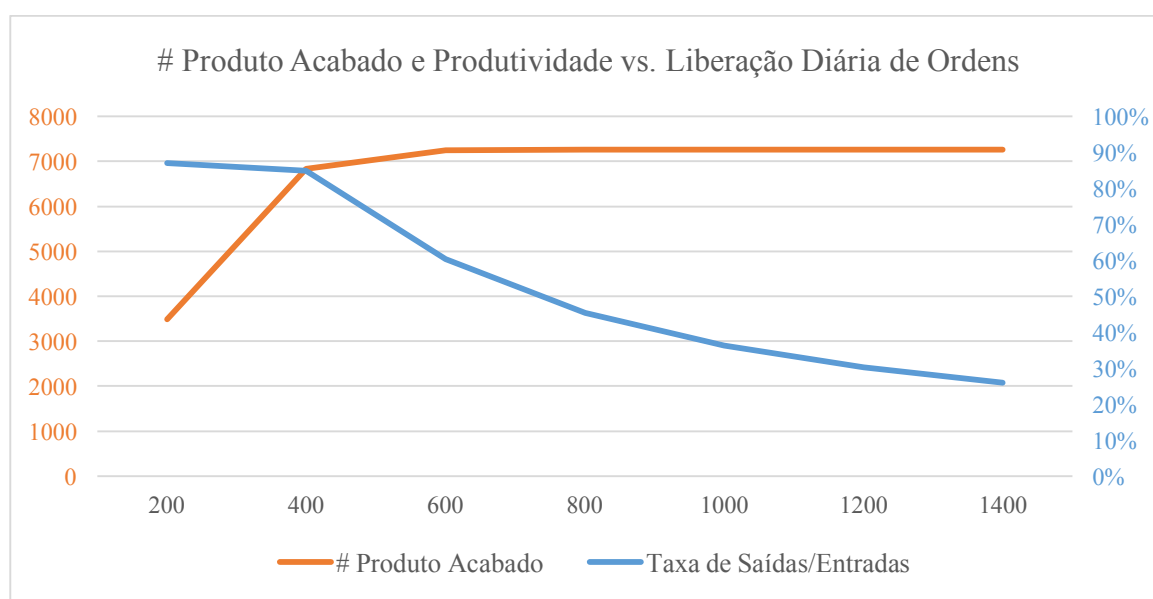
O processo com tempo de ciclo mais elevado (em comparação com outros processos no fluxo) atuará como gargalo da operação. Sua fila acumulará maior quantidade de unidades de estoque em processo.

Ao alimentar a chegada de entidades no sistema, estabeleceu-se uma frequência de chegadas em sete níveis, variando entre 200 entidades por dia até 1400 unidades por dia, para verificar o comportamento do sistema.

Por taxa de chegada baixa, entende-se a liberação diária de uma quantidade de entidades abaixo da menor capacidade diária existente no fluxo. Essa capacidade diária de produção é calculada a partir do tempo disponível no processo sobre o tempo de ciclo no mesmo. O processo com menor capacidade diária é a operação de inspeção AOI Externo, com capacidade de processar cerca de 380 painéis de circuito impresso diariamente. A programação de liberação de ordens segundo um ritmo de 200 painéis por dia gerou uma taxa de produtividade de 87%, ao rodar a simulação por um mês. Perdas podem ser explicadas por painéis perdidos ao longo do processo por problemas de qualidade e ordens liberadas nos dias finais do mês.

Por outro lado, uma taxa alta de chegada de entidades (500 painéis por dia) acima da capacidade diária do processo gargalo, apresenta uma taxa de produtividade de 71%. Ao se aumentar continuamente a quantidade de painéis liberados em um dia, a quantidade total de entidades finalizadas no mês estabiliza-se em 7259 painéis. O gráfico representado na figura 28 apresenta esse comportamento.

Figura 28 - Quantidade de PA e produtividade vs. liberação de entidades na produção

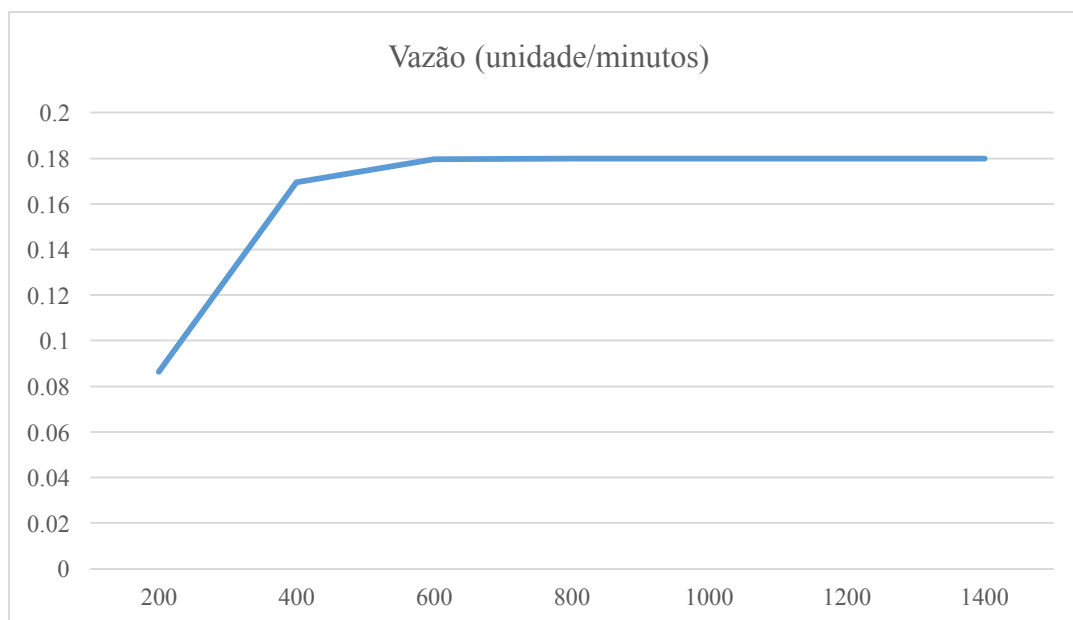


Fonte: Elaborado pelo autor



Ademais, verifica-se que a vazão do sistema, ou *throughput*, calculada através da Lei de Little, estabiliza-se em um valor de 0,18 unidades/minutos. A figura 29 indica essa tendência.

Figura 29 - Vazão vs. liberação de entidades na produção



Fonte: Elaborado pelo autor

As verificações detalhadas acima foram apenas alguns dos testes realizados para identificar erros na implementação do modelo computacional. De forma geral, o comportamento esteve dentro do esperado. Poucos erros foram identificados, como a falta de programação de turnos em determinadas operações ou a falta de associação de um recurso à uma estação de retrabalho de painéis.

#### 4.7. Validação do Modelo Computacional

A validação do modelo computacional foi realizada de forma semelhante a verificação, executando-se a simulação. No entanto, desta vez, utilizou-se os dados coletados com a responsável pelo planejamento e controle da produção da Componel para a programação de liberação de ordens no modelo.

Como indicado na metodologia, a abordagem de Validação de Caixa-Preta, de Robinson (1997), foi tomada como referência nesta etapa. Esperava-se que com dados de entradas coletados da Componel fosse possível afirmar que a simulação representa, com acurácia suficiente, a situação real da fábrica. Foram comparados indicadores reais de saída do mês de fevereiro e março de 2017 com indicadores gerados pela simulação.

De acordo com os dados apurados com a responsável pelo PCP, 945 painéis foram liberados diariamente para o processo produtivo nos meses de fevereiro e março de 2017. As ordens de produção liberadas em cada mês e concluídas no mesmo mês totalizaram 9450 painéis na

situação real. No total de cada mês, 18900 painéis foram completados, incluindo a liberação de ordens ocorridas no mês anterior e completadas no mês simulado. Esses indicadores reais foram comparados à simulação para efeito de validação da simulação.

A tabela 15 mostra o relatório de resultados da simulação do mês de fevereiro, comparados à situação real. Utilizou-se as seguintes condições de simulação:

- Período de aquecimento (*Warm-up Period*) de 1 mês na simulação, para coletar resultados a partir de um estado realista da fábrica, com WIP nas filas e estações de trabalho do fluxo.
- Período de coleta de resultados (*Results Collection Period*) de 1 mês na simulação. Os indicadores apresentados abaixo são do mês de fevereiro 2017.
- 4 replicações da simulação para obtenção de uma precisão na média de 5% (Intervalo de Confiança de 95%).

Tabela 15 - Comparação da simulação à situação real da fábrica para validação

	<b>Simulação</b>	<b>Situação Real</b>
<b>Quantidade de Produto Acabado</b>	12592	18900
<b>Lead Time Produtivo Médio (Dias)</b>	16	15

Discrepâncias podem ser notadas entre o resultado produtivo real e o resultado da simulação. Ao analisar essa questão com os *stakeholders* da Componel, dois motivos para a discrepância foram levantados. O primeiro é a utilização de horas extra nos meses de pico de demanda, que não estão sendo consideradas no modelo de simulação. A segunda razão pela discrepância foi uma decisão de processo no posto de inspeção de qualidade com maior tempo de fila, o gargalo da operação.

A estação de inspeção AOI consiste em uma inspeção de qualidade dependente de duas máquinas. A primeira identifica a posição de todos os defeitos no painel, comparando-o ao arquivo CAD enviado pelo cliente previamente à produção. Em seguida, o painel segue para a segunda máquina, onde percorre-se individualmente cada defeito apontado no primeiro sub-processo. Alguns defeitos apontados podem ser falsos, enquanto outros comprometem o funcionamento da placa. Cabe a um operador apontar defeitos verdadeiros que devem ser retrabalhados.

A decisão tomada para acelerar a estação de AOI consistiu em destinar apenas 30% de cada lote para inspeção automatizada ótica, e 70% para uma rápida inspeção visual. Dessa forma, acarreta-se em uma capacidade maior na estação de AOI e em uma produtividade mensal mais elevada. Simulou-se a fábrica sob as condições dessa decisão, com a finalidade de

validar o modelo através da situação mais próxima à real ao período em estudo. Os novos resultados de simulação são apresentados na tabela 16. Como mencionado anteriormente, dimensionou-se o número total de replicações da simulação para se obter um nível de precisão de 5% nos principais indicadores de desempenho monitorados. Esses indicadores são apresentados.

Tabela 16 - Comparação da simulação à situação real da fábrica (com ajustes no AOI)

	<b>Simulação</b>	<b>Situação Real</b>
<b>Quantidade de Produto Acabado</b>	15720	18900
<b>Lead Time Produtivo Médio (Dias)</b>	11,5	15

Novamente, nota-se discrepâncias nos valores. A quantidade de produto acabado difere visto que a simulação não considera a utilização de horas extra. Ao observar o fluxo da simulação, observa-se que uma fila se acumula no processo de Prensagem (Quente). O Engenheiro de Processos da Componel informou que há um histórico de utilização de horas extra nesta etapa, visto que o processo trabalha apenas em um turno em 5 dias da semana, consideravelmente menos do que outros processos críticos.

Em relação ao lead time produtivo médio, atribui-se essa discrepância às ordens de produção completadas ainda no início da simulação, quando o sistema está relativamente vazio e, conseqüentemente, a fila do processo gargalo pequena. Se executarmos a simulação por 6 meses, aproxima-se de uma situação mais realista da fábrica. O lead time produtivo médio, após uma simulação de 6 meses, atinge 19 dias.

Dados os resultados de simulação em ambas as situações, concluiu-se que o modelo se aproxima da situação real com uma acurácia suficiente e adequada para este projeto. Ademais, o *feedback* do time de melhoria da Componel foi colhido e o modelo foi validado. Por fim, concluiu-se também que os experimentos realizados no modelo de simulação no próximo capítulo, refletirão de maneira realista quaisquer mudanças a serem feitas na fábrica. O próximo capítulo aborda a etapa de proposta de melhoria da metodologia, ou a etapa de *analyze* segundo a estrutura de referência DMAIC deste projeto.



## 5. PROJETO DE MELHORIA – PARTE II

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: primeiramente, avalia-se qualitativamente alternativas de melhoria, com foco na necessidade de implantação de um planejamento e controle de produção seguindo uma lógica de produção puxada. O método escolhido será explorado por meio do modelo de simulação, onde diversos experimentos são detalhados e executados. Por fim, um plano de implantação da melhoria é detalhado.

### 5.1. Avaliação Preliminar de Sistemas de Produção Puxada

Esta seção avalia brevemente a viabilidade de implementação de três métodos de produção puxada no ambiente MTO da Componel: Kanban, CONWIP e DBR. O objetivo é escolher o melhor método dadas as particularidades da fábrica, e apresentar o caminho seguido na experimentação contida neste capítulo. Baseou-se na literatura disponível para auxiliar na seleção do método mais apropriado para a situação deste trabalho de formatura.

Darlington et al. (2015) analisam a seleção de um sistema de produção puxada para regular o fluxo e a quantidade de WIP em uma produção MTO. O estudo rapidamente descarta a utilização de um sistema Kanban, pois trata-se de um sistema mais adequado para uma produção *Make-to-Stock* (MTS).

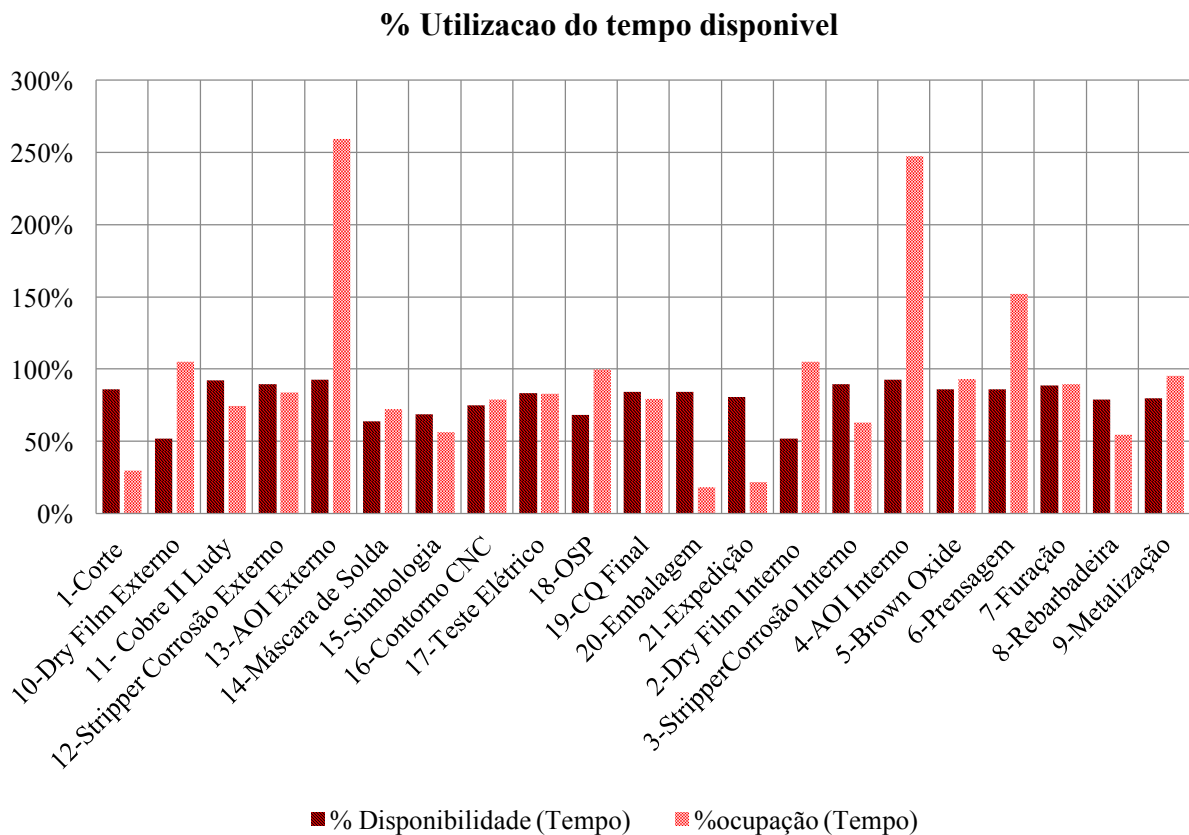
Bicheno (2004) argumenta que o CONWIP é um sistema de produção puxada atrativo para sistemas que são caracterizados por problemas de manutenção e um *mix* de produtos dinâmico. Ambas essas características acarretariam na mudança do gargalo. No entanto, o escopo do trabalho de formatura aborda apenas a placa do tipo *multilayer*, que representa mais de 90% do *mix* de produção da Componel. Além disso, a fábrica está sujeita a períodos de manutenções corretivas, mas não possui problemas recorrentes com quebras de máquinas.

Dessa forma, o sistema de produção puxada DBR foi considerado o tipo mais adequado para a produção da Componel. O DBR foi testado no modelo de simulação, seguindo os cinco passos da Teoria das Restrições.

### 5.2. Identificação do gargalo

O gargalo, como mencionado anteriormente, é a estação de inspeção ótica automatizada (AOI), onde ocorre os processos de inspeção das camadas internas e externas dos circuitos *multilayer*. A figura 30 apresenta o gráfico da utilização hipotética do tempo disponível de cada processo, segundo dados coletados pelo Engenheiro de Processo da Componel, previamente ao início do projeto de formatura.

Figura 30 - Porcentagem de utilização do tempo disponível



Fonte: Companel (2017)

A barra vermelha escura representa a porcentagem de disponibilidade de tempo em cada processo considerando paradas, setups e manutenções. A barra vermelha clara hachurada, por outro lado, indica a porcentagem de ocupação de tempo em cada processo (tempo necessário para atender uma meta diária de produção de 850 painéis). Observa-se que tanto o processo de AOI Externo, quanto AOI Interno, extrapolam em cerca de 2.5x os limites de 100%. Historicamente, a empresa tem se utilizado de horas extras e inspeções visuais nestas etapas para manter o ritmo produtivo.

No modelo de simulação executado por oito semanas e período de aquecimento de duas semanas, o processo com maior fila é o AOI Externo, seguido da Prensagem (Quente) e AOI Interno. A tabela 17 indica os resultados dos gargalos em duas situações distintas: AOI com divisão entre inspeção automatizada e visual, e AOI apenas com inspeção automatizada. Os valores destacados em vermelho indicam o processo gargalo.

Tabela 17 - Resultados de simulação sob duas condições

	<b>AOI Automatizada (1)</b>	<b>AOI Automatizada + Visual (2)</b>
<b>AOI Externo</b>	<b>Média de Painéis na Fila: 3844</b> <b>Tempo Médio na Fila: 6,6 dias</b>	<b>Média de Painéis na Fila: 76</b> <b>Tempo Médio na Fila: 0,13 dias</b>
<b>Prensagem (Quente)</b>	<b>Média de Painéis na Fila: 2147</b> <b>Tempo Médio na Fila: 3,3 dias</b>	<b>Média de Painéis na Fila: 3984</b> <b>Tempo Médio na Fila: 5,9 dias</b>
<b>AOI Interno</b>	<b>Média de Painéis na Fila: 1920</b> <b>Tempo Médio na Fila: 2,8 dias</b>	<b>Média de Painéis na Fila: Desprezível</b> <b>Tempo Médio na Fila: Desprezível</b>
<b>Fluxo Total</b>	<b>Tempo de Fluxo Médio: 15,5 dias</b> <b>Quantidade de PA: 25262</b>	<b>Tempo de Fluxo Médio: 11,7 dias</b> <b>Quantidade de PA: 28385</b>

Nota-se que o gargalo de produção é alterado quando se absorve a demanda no AOI com inspeções visuais. A fila nos processos de AOI Externo e Interno são praticamente zeradas quando se pratica inspeção visual em 70% dos painéis. Observa-se que na situação (2), a estação de retrabalho do processo de AOI Externo acumula uma fila de quase 4 mil painéis.

No entanto, deve-se considerar que o índice de aprovação na primeira inspeção (FPY), de 55,4% na inspeção automatizada, será maior sob condições de inspeção visual. Sob inspeção do olho humano, a eficácia na detecção de defeitos é substancialmente reduzida. Um estudo mais aprofundado deste processo seria necessário para determinar o ajuste da proporção de FPY. Sabe-se, no entanto, que os defeitos não detectados irão aparecer mais tarde, na etapa de Teste Elétrico, gerando um retrabalho elevado nesta estação. Dessa forma, julga-se que a utilização de inspeção visual no AOI possui um efeito paliativo, com dois desdobramentos para a produção. O primeiro é o descarte tardio de peças defeituosas sem possibilidade de recuperação, consequentemente utilizando recursos, de processos posteriores ao AOI, desnecessariamente. O segundo desdobramento é a alta quantidade de WIP aguardando retrabalho na estação de Teste Elétrico.

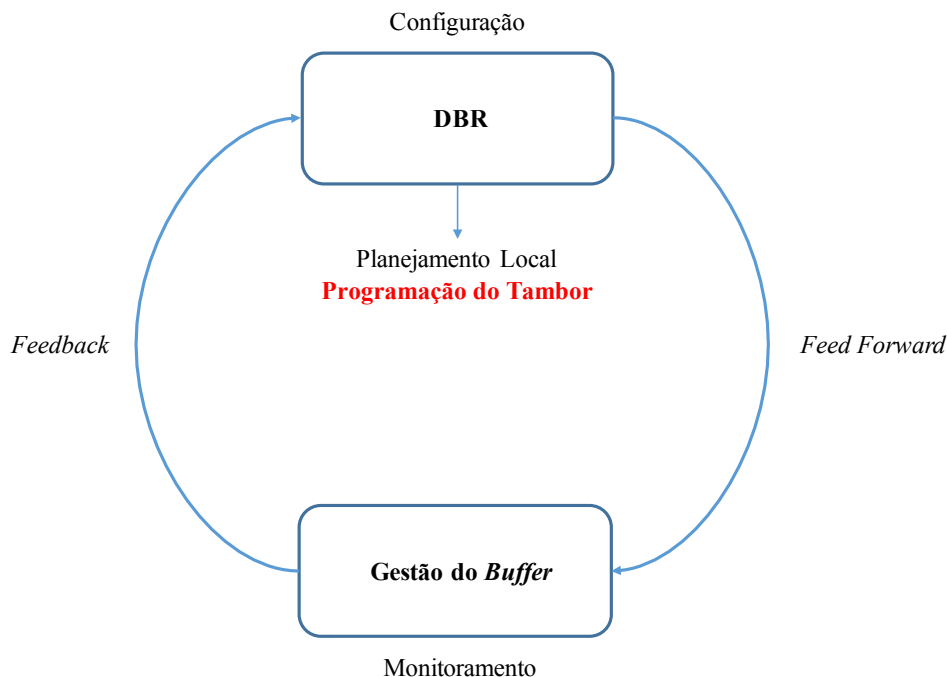
Portanto, visto o caráter paliativo do aumento da capacidade no AOI através da inspeção visual, decidiu-se abordar o sistema sob a condição (1). Considerou-se que, idealmente, a etapa de AOI deve utilizar o maquinário disponível em 100% do WIP para detectar defeitos. Dessa forma, o processo de AOI Externo representa o gargalo da operação.

### 5.3. Exploração do gargalo

Identificada a restrição do sistema, explorou-se o gargalo. Deve-se alavancar o sistema de acordo com o ritmo de produção estabelecido pelo recurso gargalo, ou seja, o tambor. Uma

forma de desenvolver o tambor é projetar um cronograma detalhado e otimizado das ordens de produção a serem processadas no recurso restritivo do sistema. A figura 31 indica o papel da programação do tambor frente ao sistema DBR global.

Figura 31 - Operação de um sistema DBR e planejamento local



Fonte: elaborado pelo autor, adaptado de Youngman (2009)

Os dados coletados na Componel indicam que o tempo de ciclo para inspecionar um painel segue uma distribuição normal com média de 2,32 minutos e desvio padrão de 0,168 minutos. Deve-se calcular o tempo de ciclo total para um lote completo de painéis para estabelecer o cronograma de produção no tambor.

Utiliza-se as fórmulas de soma de distribuições normais, segundo Wolfram (2017). Considerando-se dois conjuntos de distribuições normais, X e Y, com médias e variâncias  $(\mu_x, \sigma_x^2)$  e  $(\mu_y, \sigma_y^2)$ , têm-se que a soma dessas duas distribuições segue as fórmulas abaixo:

$$\begin{aligned}\text{Média: } \mu_{x+y} &= \mu_x + \mu_y \\ \text{Variância: } \sigma_{x+y}^2 &= \sigma_x^2 + \sigma_y^2\end{aligned}$$

Expandiu-se tal cálculo para 63 distribuições normais, dado que um lote possui 126 painéis e a estação de AOI possui duas máquinas operando simultaneamente. Tem-se que:



$$\text{Média: } \mu_{126n} = 63 * \mu_n$$

$$\text{Variância: } \sigma_{126n}^2 = 63 * \sigma_n^2$$

Onde o subscrito  $n$  representa a distribuição normal que descreve o tempo de ciclo de um único painel. Dessa forma, calcula-se que o tempo de ciclo de um lote no processo de AOI Externo segue uma distribuição normal, com média de 146,16 minutos e desvio padrão de 1,33 minuto.

Um exemplo do cronograma diário do tambor é apresentado na Tabela 18, adaptado de Wu et al. (2011). O cronograma programa as ordens de produção de acordo com a distribuição normal de tempo de ciclo de um lote, considerando uma margem de segurança de 1,88 minuto, para cima e para baixo. Isso é planejado para garantir que a estação esteja processando apenas um lote por vez e para que esteja ociosa o mínimo possível.

Tabela 18 - Exemplo de programação de ordens no tambor sem padrão de turno na estação

<b>Dados Básicos</b>					<b>Tambor</b>
<b>Seqüência</b>	<b>OP</b>	<b>Painéis</b>	<b>Data de Liberação</b>	<b>Data de Entrega</b>	<b>Horário de Entrada da OP</b>
<b>1</b>	12176/0	126	1/2/17 7:30 AM	16/2/17 7:30 AM	9/2/17 2:20 AM
<b>2</b>	12177/0	126	1/2/17 7:30 AM	16/2/17 7:30 AM	9/2/17 4:46 AM
<b>3</b>	12178/0	126	1/2/17 7:30 AM	16/2/17 7:30 AM	9/2/17 7:12 AM
<b>4</b>	12179/0	126	1/2/17 7:30 AM	16/2/17 7:30 AM	9/2/17 9:38 AM
<b>5</b>	12180/0	126	1/2/17 7:30 AM	16/2/17 7:30 AM	9/2/17 12:04 PM
<b>6</b>	12181/0	126	1/2/17 7:30 AM	16/2/17 7:30 AM	9/2/17 2:30 PM
<b>7</b>	12182/0	126	1/2/17 7:30 AM	16/2/17 7:30 AM	9/2/17 4:56 PM

Utilizou-se o modelo de simulação para definir o horário de entrada da primeira ordem de produção no processo de AOI Externo. A partir disso, programou-se as ordens de acordo com a soma da média, acrescida de um desvio padrão, sobre o momento de início da primeira ordem.

É importante lembrar que o processo AOI Externo divide sua capacidade com o AOI Interno. O AOI Externo opera das 18:00 às 06:00, de segunda à sexta, e em um turno de 8 horas aos sábados. Dessa forma, a programação da ordem número 2, por exemplo, não pode ser seguida à risca, pois a estação estará realizando o processo de AOI Interno nesse horário.

Reprogramou-se as ordens de acordo com os turnos programados para o processo AOI Externo. O cronograma exemplo resultante encontra-se na tabela 19.

Tabela 19 - Exemplo de programação de ordens no tambor com padrão de turno na estação

Dados Básicos					Tambor
Sequência	OP	Painéis	Data de Liberação	Data de Entrega	Horário de Entrada da OP
1	12176/0	126	1/2/17 7:30 AM	16/2/17 7:30 AM	9/2/17 2:20 AM
2	12177/0	126	1/2/17 7:30 AM	16/2/17 7:30 AM	9/2/17 4:46 AM
3	12178/0	126	1/2/17 7:30 AM	16/2/17 7:30 AM	9/2/17 7:23 PM
4	12179/0	126	1/2/17 7:30 AM	16/2/17 7:30 AM	9/2/17 9:49 PM
5	12180/0	126	1/2/17 7:30 AM	16/2/17 7:30 AM	10/2/17 12:15 AM
6	12181/0	126	1/2/17 7:30 AM	16/2/17 7:30 AM	10/2/17 2:42 AM
7	12182/0	126	1/2/17 7:30 AM	16/2/17 7:30 AM	10/2/17 5:08 AM

Nota-se que a capacidade diária de processamento do processo reduziu-se pela metade. Mais adiante, no quarto passo (elevação do gargalo), serão detalhadas mudanças para aumentar a capacidade diária do processo AOI Externo.

O cronograma proposto para o tambor é o ponto de partida para projetar as outras dimensões do DBR, o Pulmão e a Corda.

#### 5.4. Subordinação do Sistema ao Gargalo

A subordinação do sistema ao gargalo ocorre quando se programa a liberação inicial de materiais de acordo com o ritmo de operação do gargalo (tambor). O momento de liberação da ordem de produção para o chão de fábrica pode ser calculado usando a fórmula abaixo, adaptada de Foote (1996).

$$MLM_i = MPI_i - \sum_k^V m_{jk} - TB$$

Onde

$MLM_i$ : Momento de Liberação de Material da  $i$ -ésima ordem de produção na primeira estação de trabalho

$MPI_i$ : Momento Programado de Início da  $i$ -ésima ordem de produção na estação de trabalho gargalo

$m_{jk}$ : Tempo de ciclo da estação  $k$  processando o tipo de item  $j$

$TB$ : Tamanho do *Buffer* (em unidade de tempo)

Como no caso estudado avalia-se a fábrica produzindo apenas placas do tipo *multilayer*, pode-se simplificar o termo  $m_{jk}$  para apenas  $m_k$ , ou seja, o tempo de ciclo do processo  $k$ . A partir da programação de ordens no gargalo, pode-se calcular o exato momento de liberação de cada ordem para a primeira etapa de produção, o processo de Corte.

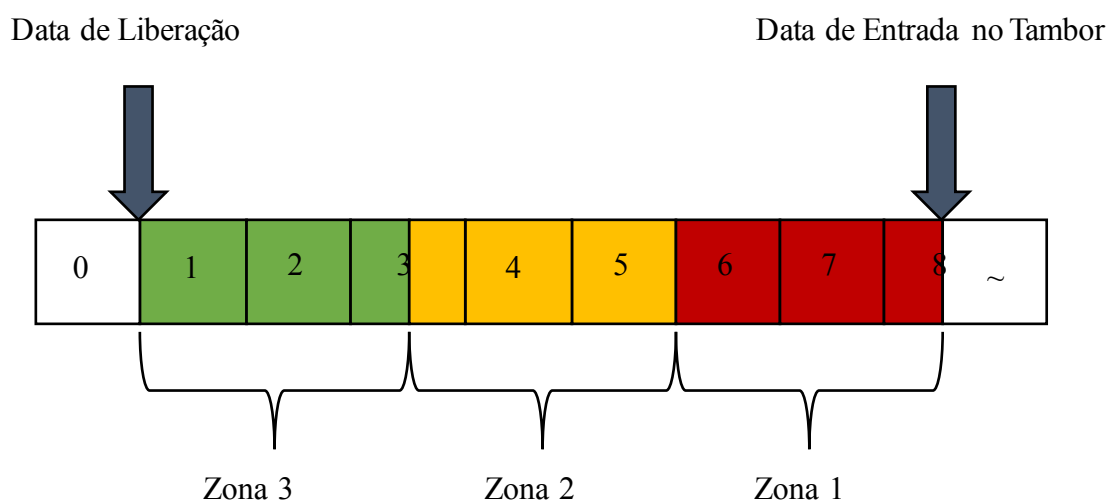
No entanto, deve-se definir um Pulmão (*buffer*) adequado de tempo. O Pulmão garante que o gargalo do sistema estará protegido de eventuais falhas em processos à montante de sua posição, visto que poderá manter sua utilização total e a vazão do sistema continuará igual.

Para dimensionamento do buffer, testou-se primeiramente a regra geral recomendada por Youngman (2009). Mediu-se o tempo para percorrer os processos desde a liberação da ordem até o processo gargalo. Em seguida, dividiu-se esse tempo pela metade, para obter o tempo de buffer.

A simulação da fábrica foi utilizada para determinar o tempo médio necessário para um painel chegar na etapa gargalo. O tempo médio para chegar à fila foi de 8,5 dias, enquanto que o tempo médio na fila antes do recurso gargalo foi de 6,6 dias. Dessa forma, o tempo total médio entre a liberação da ordem de produção e o momento de entrada para processamento no AOI Externo foi de aproximadamente 15 dias. Considerou-se, então, 7,5 dias de pulmão.

Outra regra geral indicada por Youngman (2009) é a divisão do pulmão em três zonas, cada uma contendo um terço do tempo total de pulmão. A figura 32 indica a divisão de zonas para o sistema produtivo da Componel. Os números representam as unidades de dias do pulmão.

Figura 32 - Zonas do pulmão de proteção à restrição



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Youngman (2009)

Dividir o pulmão em três zonas é crucial para o que é chamado de gestão do pulmão (*buffer management*). Na zona vermelha, estabelece-se a seção do pulmão mensurada em unidades de estoque em processo. A zona vermelha representa a fila do processo de AOI Externo, ou seja, do tambor do sistema. Idealmente, a fila deve ter uma quantidade de WIP equivalente a 2,5 dias de trabalho. A equação abaixo demonstra a conversão do pulmão de tempo da zona 1 em uma quantidade absoluta de WIP:

$$WIP_{Zona\ 1} = \frac{2,5\ dias * 12\ horas * 60\ minutos * 126\ unidades/lote}{146,16\ min/lote} = 1551\ unidades$$

As zonas amarela e verde podem ser gerenciadas com um *buffer* de tempo. Falta de WIP na zona verde é considerado normal. No entanto, falta de WIP na zona amarela indica que é necessário liberar novas ordens para o lote chegar no AOI Externo a tempo.

Ressalta-se novamente que o AOI Externo opera apenas 12 horas por dia, dado que divide a capacidade com o processo de AOI Interno. É necessário existir um buffer de segurança de estoque em processo de 1551 unidades na fila do AOI Externo, aguardando processamento. Dessa forma, protege-se o gargalo e garante-se que o sistema continuará operando sob o ritmo do tambor, caso haja interrupções ou quebras em processos não-gargalo.

O último elemento do DBR, além do tambor e do pulmão, é a corda. A corda age como mecanismo de proteção ao sistema como um todo de excesso de WIP. A corda liga o tambor ao início do fluxo produtivo. Quando há excesso ou falta de WIP no sistema, a corda é o mecanismo de comunicação para regular a entrada de novo material apropriadamente.

As ordens de produção liberadas em fevereiro de 2017 da Componel serão reprogramadas mais adiante neste capítulo, considerando o tambor, o pulmão e a corda.

### 5.5. Elevação do Gargalo

A elevação do gargalo consiste em aumentar a capacidade no gargalo para aumentar o seu *throughput*. Nesta seção, explora-se três alternativas de se aumentar a capacidade, testadas pelo modelo de simulação. Duas alternativas são ligadas aos turnos programados da estação de AOI. A terceira alternativa avalia o investimento em uma nova máquina. A primeira e a segunda alternativas podem se encaixar como formas de se explorar o gargalo, detalhado anteriormente no passo dois da TOC.

É importante ressaltar que essas mudanças são testadas no modelo de simulação sem associação com o planejamento e controle da produção sob o sistema DBR. As ordens são liberadas na simulação de acordo com a liberação padrão da Componel (945 painéis por dia, às 07:30, excluindo finais de semana). Nessa etapa, o objetivo é verificar qual das melhorias tem impacto mais significativo sobre a capacidade do processo gargalo e do sistema produtivo como um todo.

### 5.5.1. Replanejamento de Turnos

O replanejamento de turnos abre possibilidades de aumentar a capacidade no AOI Externo. Atualmente, o AOI Externo opera em um turno das 18:00 às 06:00, de segunda à sexta, e das 9:00 às 17:00 aos sábados. Considerou-se algumas possibilidades de expandir o tempo de operação desse processo, detalhadas a seguir.

#### 5.5.1.1. EXPANSÃO DO TEMPO DE OPERAÇÃO

Testou-se utilizar na estação de AOI o tipo de turno utilizado nas estações de Furação e Contorno CNC. Essas estações operam em um regime 12/36, com 4 equipes trabalhando 12 horas e folgando 36 horas, se revezando dessa forma. Esse tipo de turno traduz para o modelo de simulação como dois turnos, de doze horas cada, operando de 24 horas por dia, 7 dias por semana. A principal diferença para o tempo de operação atual é que, sob esse regime de turno, a operação na estação é contínua aos sábados e domingos. Atualmente, o AOI opera apenas em um turno de 8 horas aos sábados.

Os resultados de simulação com a expansão do tempo disponível de operação no AOI estão indicados na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados de simulação com expansão do tempo de operação no AOI

<b>Aumento da Capacidade AOI</b>	<b>Turno 12/36</b>
<b>AOI Externo</b>	<b>Média de Painéis na Fila:</b> 1096 <b>Tempo Médio na Fila:</b> 0,3 dia
<b>Prensagem (Quente)</b>	<b>Média de Painéis na Fila:</b> 3490 <b>Tempo Médio na Fila:</b> 5,2 dias
<b>AOI Interno</b>	<b>Média de Painéis na Fila:</b> 400 <b>Tempo Médio na Fila:</b> 0,6 dia
<b>Fluxo Total</b>	<b>Tempo de Fluxo Médio:</b> 12,4 dias <b>Quantidade de PA:</b> 28350

O efeito da expansão de tempo de operação no AOI foi um aumento de produtividade do sistema de 8 pontos percentuais, e uma redução do *lead time* produtivo médio de 3,1 dias, quando comparado à situação inicial.

Nota-se que, similarmente ao que ocorreu quando se expandiu a capacidade do AOI por meio da alocação de parte da carga para inspeção visual, o novo gargalo tornou-se a etapa de Prensagem (Quente). A produtividade do sistema na situação acima foi de 75%, a mesma que

na situação de 70% inspeção visual e 30% automatizada. O *lead time* produtivo médio teve um valor adicional de 0,7 dia sob o novo regime de turno.

Uma análise mais aprofundada de custos seria necessária para verificar qual das duas soluções (a solução atual utilizada pela empresa e o novo regime de turno) traria menor despesas operacionais e custos para a Componel.

Visto que a inspeção visual falha frequentemente na identificação de defeitos, presume-se que os custos de qualidade e despesas de transformação de placas defeituosas são mais onerosos do que o investimento em recursos humanos e expansão do tempo de operação da estação AOI. Tal afirmação é baseada em observações empíricas no chão de fábrica, onde se constatou uma grande quantidade de WIP aguardando retrabalho na estação de teste elétrico (posterior ao AOI), onde os defeitos foram devidamente verificados. No entanto, uma análise mais aprofundada de custos, fora do escopo deste projeto, teria que ser conduzida.

Experimentou-se, também, com o aumento do tempo disponível de operação no processo de Prensagem (Quente), operando por 8 horas aos sábados. Os resultados encontram-se na tabela 21.

Tabela 21 - Resultados de simulação com expansão do tempo de operação no AOI e na prensagem

<b>Aumento da Capacidade Prensagem</b>	<b>Com Turno de Sábado</b>
<b>AOI Externo</b>	<b>Média de Painéis na Fila: 2458</b> <b>Tempo Médio na Fila: 3,6 dias</b>
<b>Prensagem (Quente)</b>	<b>Média de Painéis na Fila: 450</b> <b>Tempo Médio na Fila: 0,7 dia</b>
<b>AOI Interno</b>	<b>Média de Painéis na Fila: 400</b> <b>Tempo Médio na Fila: 0,6 dia</b>
<b>Fluxo Total</b>	<b>Tempo de Fluxo Médio: 11,8 dias</b> <b>Quantidade de PA: 29041</b>

O gargalo retorna a ser o processo de AOI Externo. No entanto, aumenta-se a quantidade de produtos acabados na saída no período considerado de simulação (8 semanas) em quase 700 painéis, e reduz-se o *lead time* produtivo médio em 0,6 dia.

#### 5.5.1.2. ALOCAÇÃO DE MÁQUINAS NOS TURNOS

A estação de AOI atualmente possui duas máquinas, operando simultaneamente. Ambas as máquinas operam de forma dedicada ao processo de AOI Externo ou AOI Interno, de acordo com o horário do dia e o turno programado. Outro experimento conduzido na simulação foi

dividir as máquinas da estação, de forma que uma máquina esteja 100% do tempo dedicada ao AOI Interno e a outra 100% do tempo dedicada ao AOI Externo.

Dessa forma, garante-se que ambos os processos operam 24 horas por dia de segunda-feira à sexta-feira, além de operar aos sábados. Os novos resultados de simulação sob essa condição encontram-se indicados na tabela 22. A expansão de tempo de operação da seção anterior não foi considerada na simulação desta seção.

Tabela 22 - Resultados de simulação com uma máquina dedicada ao AOI Interno/Externo

<b>Divisão de Máquinas Externo e Interno</b>	
<b>AOI Externo</b>	<b>Média de Painéis na Fila: 4895</b> <b>Tempo Médio na Fila: 8,3 dias</b>
<b>Prensagem (Quente)</b>	<b>Média de Painéis na Fila: 604</b> <b>Tempo Médio na Fila: 1 dia</b>
<b>AOI Interno</b>	<b>Média de Painéis na Fila: 3547</b> <b>Tempo Médio na Fila: 5,2 dias</b>
<b>Fluxo Total</b>	<b>Tempo de Fluxo Médio: 16,6 dias</b> <b>Quantidade de PA: 24525</b>

Observa-se que, sob essa condição, o desempenho do sistema é pior comparado à situação inicial, onde a quantidade final de produto acabado era de 736 painéis adicionais, e o lead time produtivo médio era 1 dia menor. Dessa forma, descartou-se prontamente essa alternativa de elevação do gargalo.

#### **5.5.2. Investimento em Novas Máquinas**

Outra alternativa de melhoria é o investimento em maquinário adicional para a estação de AOI. A simulação foi executada considerando a adição de uma nova máquina na estação de trabalho, de forma que o AOI Interno e o AOI Externo operam com três máquinas.

Como esperado, a adição de uma nova máquina tem efeito similar a expansão de tempo disponível de operação. O gargalo simplesmente se transfere para a Prensagem (Quente), e a capacidade não aumenta significativamente. Calculou-se que o ganho de produção com a adição de uma máquina extra foi de 3088 painéis em 8 semanas.

Parte desse efeito é explicado também pela grande fila de WIP que se forma na estação de retrabalho do AOI Externo, visto que o FPY (*First Pass Yield*) desta etapa é de apenas 55,4% e o tempo para retrabalhar um painel é de 6 minutos, em média.

Realizou-se um benchmarking de preços de máquinas disponíveis no mercado. Um novo equipamento custa 110 mil dólares, segundo cotação informada pelo Engenheiro de Processos da Componel. Buscou-se equipamentos semelhantes para efeito de avaliação comparativa, onde se encontrou máquinas seminovas com valores entre 50 mil e 70 mil dólares. Um painel tem um preço médio de R\$305,00.

Uma breve análise de retorno sobre investimento é apresentada na tabela 24, com parâmetros adicionais relevantes na tabela 23. Utilizou-se a cotação dólar-real da data 06/11/2017, no valor de 3,259. A margem de lucro sobre uma placa varia entre 10% e 15%, segundo dados coletados com o Diretor Comercial da empresa.

Tabela 23 - Preço médio de um painel *multilayer* e intervalo de margem de lucro

Preço Médio/Painel	Margem de Lucro (%)	Lucro (R\$)
R\$305,00	10%	R\$30,50
	15%	R\$45,75

Tabela 24 - Análise financeira de retorno sobre investimento (*payback*) na compra de uma máquina AOI

Cotação Dólar	3,259	Painéis Adicionais	3088	Semanas	8
Custo Máquina (\$)	Custo Máquina (R\$)	Painéis para <i>Payback</i> (10%)	Painéis para <i>Payback</i> (15%)	Semanas para <i>Payback</i> (10%)	Semanas para <i>Payback</i> (15%)
\$50.000,00	R\$162.950,00	5343	3562	13,8	9,2
\$70.000,00	R\$228.130,00	7480	4986	19,4	12,9
\$110.000,00	R\$358.490,00	11754	7836	30,5	20,3

Dois dos cenários apresentados na tabela 24 foram avaliados com o time de melhoria da Componel (considerando que há demanda constante pelo *multilayer*):

- **Investimento Maior, Lucro Menor:** Se a empresa investir 110 mil dólares e obtiver uma margem de lucro média de 10% sobre seu produto, produzindo no mesmo ritmo da simulação, obterá um retorno sobre investimento em aproximadamente **8 meses**. É considerado um investimento inviável para a empresa no momento.
- **Investimento Menor, Lucro Maior:** Se a empresa investir 50 mil dólares e obtiver uma margem de lucro de 15% sobre seu produto, produzindo no mesmo ritmo da



simulação, obterá um retorno sobre investimento em aproximadamente **2 meses**. Trata-se de um investimento mais realista, porém menos atrativo para a empresa do que a utilização de turnos extras para produzir mais painéis.

### **5.6. Proposta de Implantação de Melhoria**

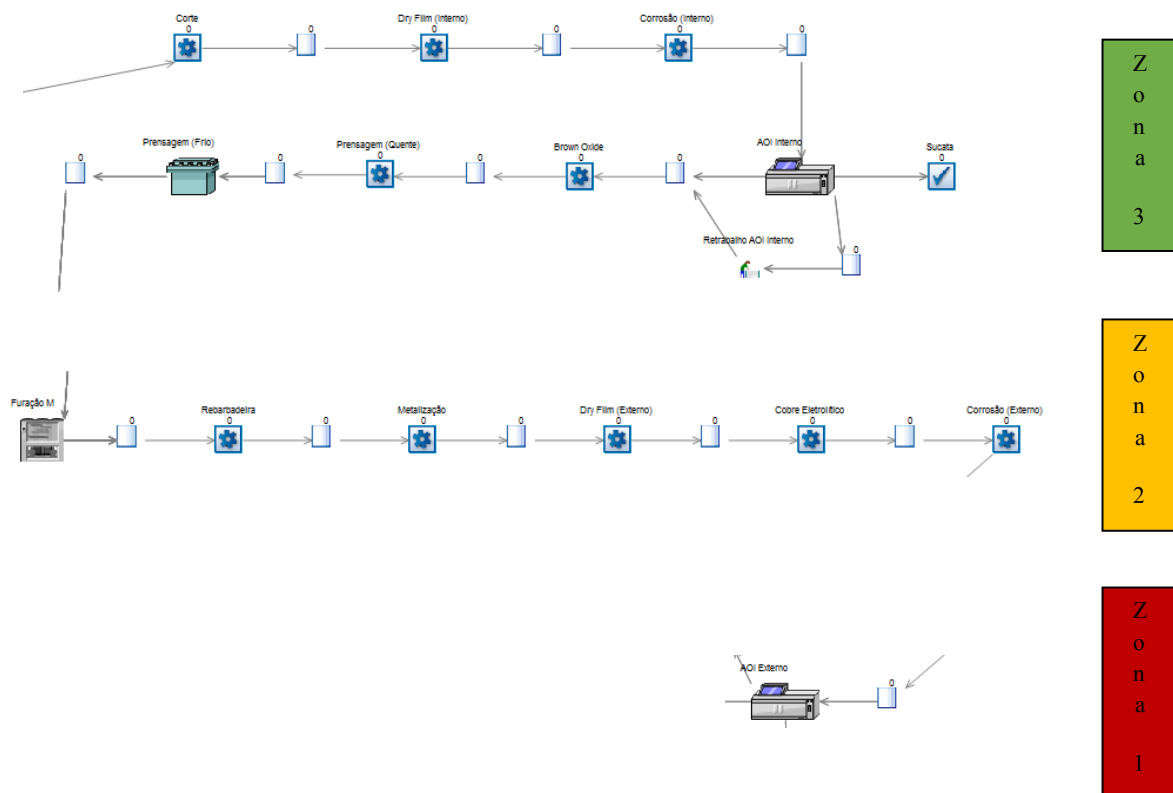
Dada a análise nas seções anteriores deste capítulo, propõe-se a implantação de um Sistema *Drum-Buffer-Rope* no fluxo produtivo da Componel. Os parâmetros, informações e instruções necessários para implantação do sistema encontram-se detalhados a seguir:

1. **Identificação do Gargalo:** AOI Externo
2. **Exploração do Gargalo:**
  - a. Primeiramente, aumento do tempo de operação (regime de turno 12/36 no AOI, AOI Externo operando 7 dias por semana, 12 horas por dia)
  - b. Estabelecer um cronograma da chegada de lotes no AOI Externo (Tambor), como o exemplo apresentado anteriormente.
  - c. A programação de início de processamento de lotes no AOI Externo deve estar espaçada de acordo com seu tempo de ciclo: 146 minutos
3. **Subordinação do Sistema ao Gargalo:**
  - a. Pulmão de Recurso de 7,5 dias, metade do lead time produtivo médio entre a liberação da ordem para Corte e a entrada no AOI Externo.
  - b. Divisão do pulmão de recurso em três zonas, de 2,5 dias cada, para gestão adequada.
  - c. Nível de WIP adequado na fila do AOI Externo: 1551 painéis
4. **Elevação do Gargalo**
  - a. Caso a meta de melhoria ainda não for atingida, considerar expandir a capacidade adicionalmente com o investimento em novo maquinário.
5. **Repetição dos Passos Anteriores:**
  - a. Identificação da Prensagem (Quente) como novo gargalo – possibilidade de segundo ciclo de melhoria.

Experimentou-se, com a simulação, seguir este roteiro, observar os resultados e compará-los às metas estabelecidas no início do projeto (ver Project Charter). Dada uma limitação do Simul8 no que tange a programação precisa da liberação de novos lotes e da entrada de lotes no AOI Externo, simplificou-se a implantação do sistema DBR. Ressalta-se que, idealmente, a implantação real na fábrica deve respeitar rigorosamente o cronograma previsto para o gargalo, utilizando a corda para liberar novos lotes no chão de fábrica.

Para se aproximar o máximo possível à um sistema DBR na simulação, liberou-se ordens no mesmo ritmo que anteriormente (945 painéis por dia), porém para uma fila fantasma (anterior ao processo de Corte). Delimitou-se as três zonas de 2,5 dias cada do pulmão, estabelecendo um limite de 1551 WIP para cada zona. A separação das etapas por zonas é apresentada na figura 33.

Figura 33 - Zonas do pulmão de recurso aplicadas ao modelo de simulação



Fonte: Elaborado pelo autor

A zona 1 consiste apenas na fila anterior ao processo de AOI Externo, onde deve haver um máximo de 1551 WIP para garantir que o gargalo opere em 100% do tempo no qual estiver disponível, porém que não se encontre sobrecarregado. Além disso, tentou-se simular o efeito da Corda, onde o AOI Externo “comunica” com a etapa de Corte para puxar ou atrasar a entrada de novos trabalhos da fila fantasma. Para tal, estabeleceu-se o limite de WIP por zona e um limite de WIP geral dos processos entre o Corte e o AOI Externo (inclusive).

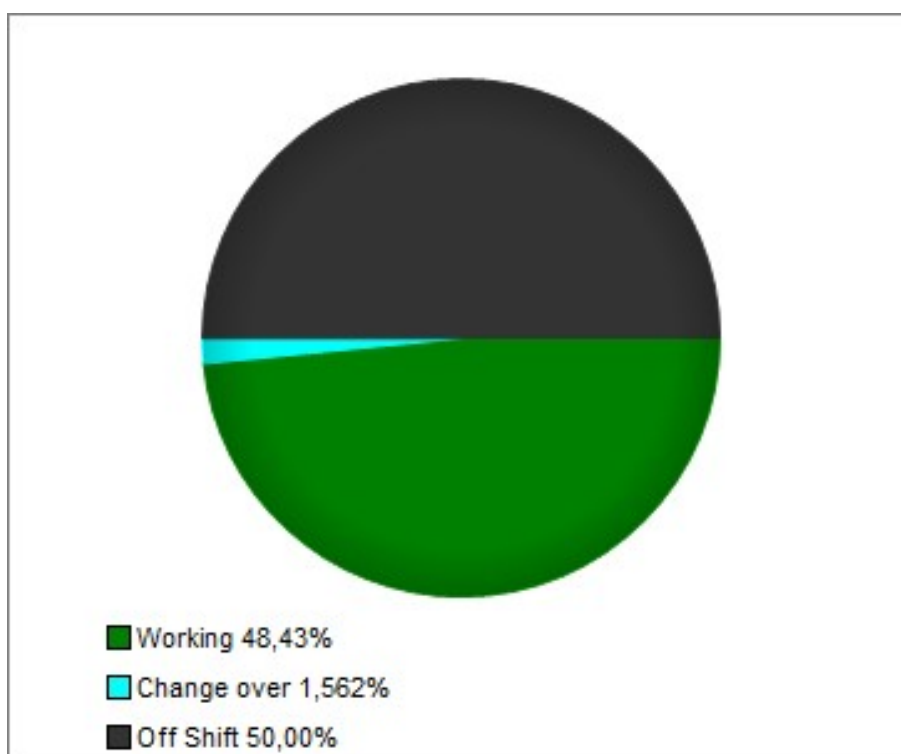
Sob essas condições, o modelo de simulação, executado por 8 semanas com período de aquecimento de 2 semanas, apresentou os resultados indicados na tabela 25.

Tabela 25 - Resultados finais da simulação comparados às metas do projeto de melhoria

Métrica	Atual	META	% Melhoria	unidades	Resultado Simulação
Lead Time Produtivo (semanas)	2	1,5	25%	0,5	<b>1,69</b>
WIP Médio na Fila	3000	2000	33%	1000	<b>1030</b>
Tempo de Fila no Gargalo (dias)	6	3	50%	3	<b>1,70</b>

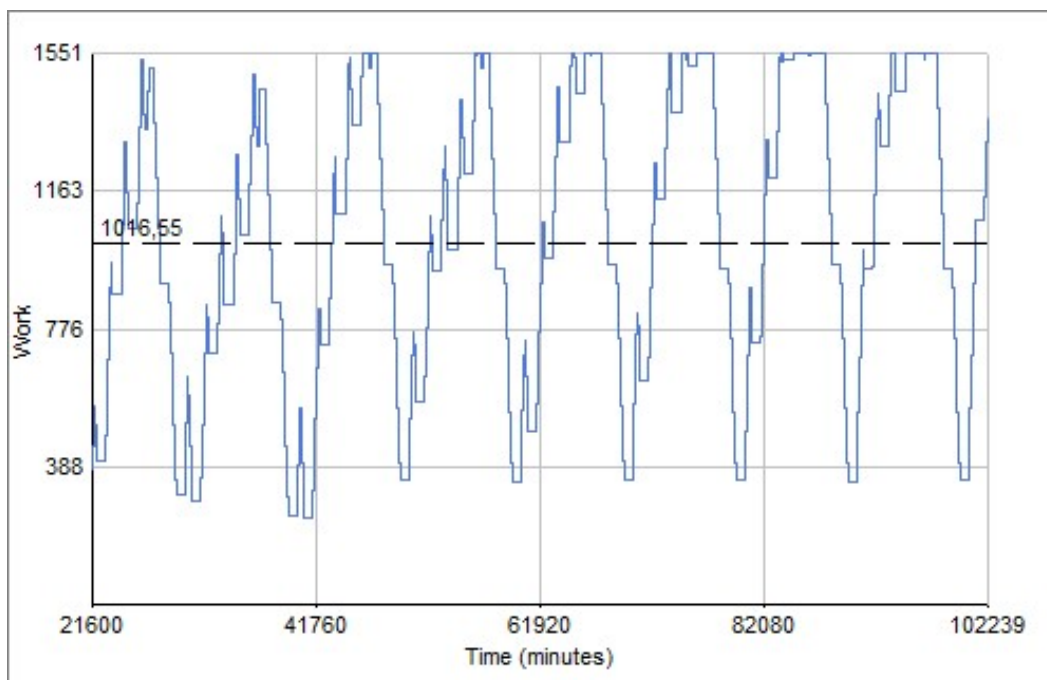
Os gráficos apresentados nas figuras 34, 35 e 36 trazem mais contexto sobre o comportamento das três métricas no ambiente de simulação.

Figura 34 - Utilização do AOI Externo na simulação



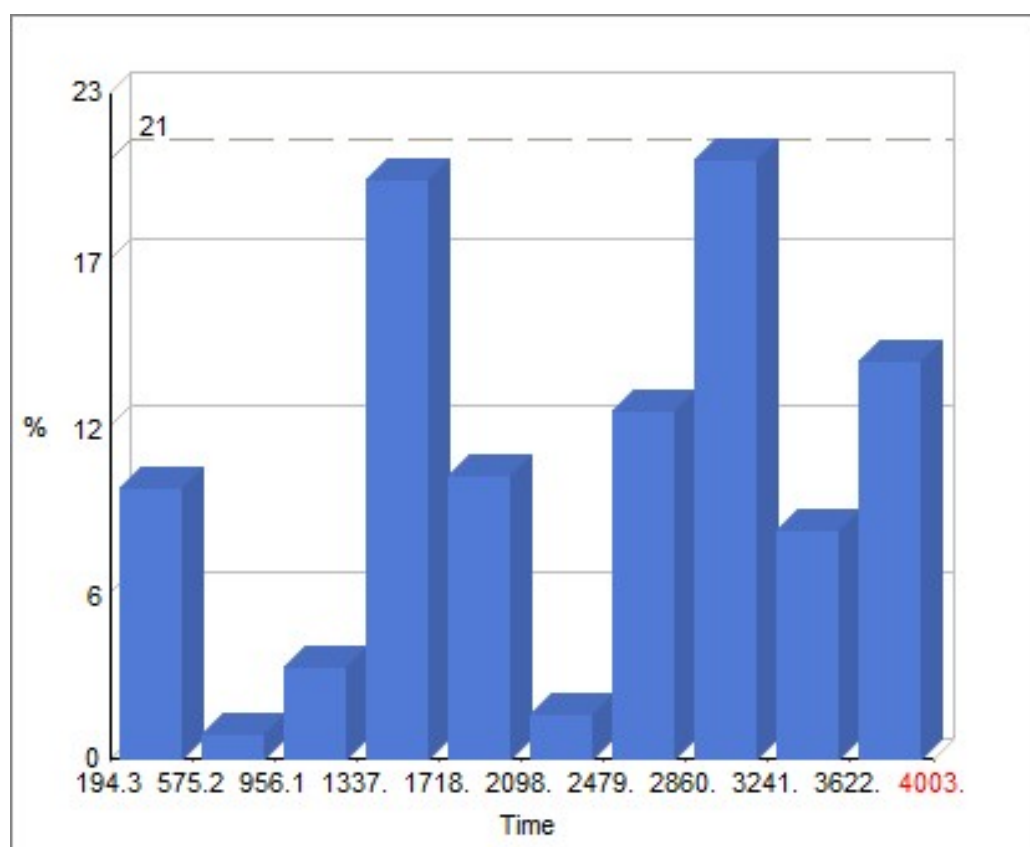
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35 - Tamanho da fila do AOI Externo ao longo do tempo



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 36 - Distribuição do tempo em fila para o AOI Externo



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que a única meta estabelecida e não alcançada foi a de redução do lead time produtivo. Reduziu-se o lead time produtivo em 16%, ainda abaixo dos 25% estipulados. No entanto, iterações adicionais dos cinco passos da Teoria das Restrições e a reprogramação do Tambor, Corda e Pulmão no modelo de simulação podem trazer resultados ainda mais positivos.

Uma clara oportunidade de melhoria surgiu após a implantação dos ajustes mais recentes na simulação: a fila de WIP que se forma na estação de retrabalho, imediatamente após o AOI Externo.

Outro caminho para atingir a meta de melhoria estabelecida é o investimento em novas máquinas, condizente com o quarto passo da Teoria das Restrições, de elevação do gargalo.



## 6. CONCLUSÕES

### 6.1. Síntese do Trabalho

Esse projeto de formatura foi realizado em uma fábrica brasileira de placas circuitos impressos (PCIs), a Componel. A Componel está no mercado há mais de 30 anos e fornece PCIs para grandes empresas, como Samsung, LG e Microsoft. A Componel opera de acordo com uma estratégia *Make-to-Order*, visto que o produto é produzido de acordo com as especificações do cliente. O escopo desse projeto abordou somente a linha do produto *Multilayer*, responsável por cerca de 90% do faturamento da empresa no período estudado.

Atualmente, a fábrica registra baixa demanda proveniente do mercado. No entanto, em períodos com picos de demanda, como fevereiro e março de 2017, houve uma dificuldade no cumprimento de prazos prometidos aos clientes, gerada principalmente pela elevada quantidade de *Work-in-Process* (WIP) e a falta de fortes mecanismos de controle de produção.

A revisão bibliográfica deste trabalho de formatura abordou tópicos como estratégia MTO, estoque em processo e seus mecanismos de controle (CONWIP/DBR), a Teoria de Restrições, o método de melhoria contínua do Lean Seis Sigma (DMAIC) e a simulação como uma ferramenta de gestão de operações.

O projeto possuiu como objetivo propor melhorias que visassem o controle de estoque em processo e a redução do lead time produtivo da fábrica. Considera-se que tal objetivo foi cumprido, visto que se provou, através de um modelo de simulação, os benefícios de uma produção puxada com controle de estoque em processo.

A principal metodologia utilizada para esse projeto foi a simulação como uma ferramenta de melhoria contínua. Através da simulação, foi possível testar cenários e alternativas, ajustando parâmetros nos processos e na entrada de ordens de produção.

No que diz respeito à melhoria, propõe-se o aumento da eficiência operacional do processo gargalo, através de uma expansão dos turnos de trabalho utilizados nesta estação. Propôs-se, também a implantação de um sistema de controle de produção em um ambiente de produção puxada, o *Drum-Buffer-Rope*. Como próximo passo, a empresa, juntamente com o autor do trabalho, formou um time de melhoria para avaliar os aspectos operacionais da implantação de um sistema DBR.

## 6.2. Limitações

Reconhece-se duas limitações neste projeto. A primeira, é referente ao escopo do projeto. Um grande foco foi dado sobre a produção de placas multilayer em um período de alta demanda. Deve-se atentar para mudanças no *mix* dos tipos produto comercializado e para as flutuações de demanda. Caso outro produto passe a ser o mais relevante para a empresa, a simulação necessitará de ajustes para acomodar essa nova realidade. Por outro lado, o investimento cogitado no aumento de capacidade do gargalo e implantação do DBR, parte do princípio de que a demanda se mantém constante. Uma análise aprofundada seria necessária para averiguar a viabilidade financeira das melhorias em outras condições de mercado.

Outra limitação que se identificou foi em relação aos *softwares* utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Versões acadêmicas do Stat:Fit e do Simul8 foram utilizadas. Tais versões possuem menos funcionalidades frente às versões profissionais. O Stat:Fit serve para ajustar um conjunto de dados à uma curva estatística. A versão acadêmica restringe esse conjunto a 50 valores individuais. De forma semelhante, o Simul8 restringe recursos que poderiam ser aproveitados neste trabalho, como o *Scenario Manager*. Essa funcionalidade permite rodar a simulação, com experimentos de diversos cenários, de forma ágil.

## 6.3. Desdobramentos

Este trabalho de formatura pode ser estendido para diferentes direções. A execução de experimentos focados no aumento da capacidade no gargalo de produção e no controle de WIP pode ser expandida para outros projetos semelhantes. O modelo de simulação é complexo, possuindo programação de tempos de ciclo, recursos, turnos, tempos de parada, tempos de movimentação, etc. Tal forma de modelar a linha produtiva de uma empresa pode ser útil para outros acadêmicos.

Como desdobramento específico para este trabalho, é importante destacar uma análise financeira que pode ser associada à Teoria das Restrições e ao DBR. Pode-se avaliar o impacto financeiro das mudanças propostas, através do cálculo do aumento do fluxo e, consequentemente, da receita versus a variação de despesas operacionais.

Outro desdobramento possível é a condução de um maior número de experimentos, com diferentes tamanhos de *buffers* no DBR, para realizar uma análise de sensibilidade e se obter o melhor desempenho possível no sistema. No entanto, a Gestão do Pulmão na fábrica permite uma melhor avaliação, em tempo real, da proteção ao gargalo.

Por fim, os resultados da simulação foram apresentados para o time de melhoria formado com a Componel. Pretende-se aplicar o DBR na linha produtiva, dados os resultados positivos apresentados até o final deste projeto. A empresa possui interesse em adquirir o software de



simulação para auxiliar na implantação desse tipo de sistema de produção puxada. A empresa pretende estudar os detalhes operacionais para realizar a transição de uma produção empurrada para uma produção puxada baseada no DBR.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRACI. Associação Brasileira de Circuitos Impressos, Montagem de Placas, Teclados de Membrana e Componentes Eletrônicos. **Placas de Circuito Impresso: O Desempenho do Setor**. 2012. 13p.
- BCC RESEARCH. **Printed Circuit Boards: Technologies and Global Markets**. 2016. 171p. Disponível em: <<https://www.bccresearch.com/market-research/semiconductor-manufacturing/printed-circuit-boards-tech-markets-report-smc103a.html/>>. Acesso em: 05 jun. 2017
- BREMER, F. C; LENZA, R. P. **Um modelo de referência para gestão da produção em sistemas de produção assembly to order: ato e suas múltiplas aplicações**. *Gest. Prod.*, São Carlos, v. 7, n. 3, p. 269-282, dez. 2000.
- CHIAVENATO, I. **Iniciação ao Planejamento e Controle de Produção**. São Paulo: McGraw-Hill, 1990. 116p
- CHWIF, L. et al. **Introdução ao Simul8: um guia prático**. São Paulo: Ed. dos Autores, 2013.
- DARLINGTON, J. et al. Design and implementation of a Drum-Buffer-Rope pull-system. *Production Planning & Control*, v. 26, n. 6, p. 489-504, abril 2015. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/09537287.2014.926409?scroll=top&needAccess=true/>>. Acesso em: 19 ago. 2017
- DAVIS, P. K. **Generalizing concepts and methods of verification, validation, and accreditation (VV&A) for military simulations**. RAND CORP SANTA MONICA CA, 1992.
- EHIE, I.; SHEU, C. Integrating six sigma and theory of constraints for continuous improvement: a case study. *Journal of manufacturing technology management*, v. 16, n. 5, p. 542-553, 2005. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/17410380510600518/>>. Acesso em 21 set. 2017
- FERRIN, D. M.; MILLER, M. J.; MUTHLER, D. Lean sigma and simulation, so what's the correlation? V2. In: **Proceedings of the 37th conference on Winter simulation**. Winter Simulation Conference, 2005. p. 2011-2015.
- FOOTE, J. L. **Practical buffer sizing techniques under Drum-Buffer-Rope: development of a model and fuzzy logic implementation**. 1996. 229p. Tese de Doutorado. Massey University. Disponível em <<https://mro.massey.ac.nz/handle/10179/7269/>>. Acesso em: 07 out. 2017
- GASTERMANN, B. et al. Implementation of a Software Prototype with ConWIP Characteristics for Production Planning and Stock Management. *Procedia Engineering*, v. 69, 423-432. Disponível em < <http://www.sciencedirect.com/journal/procedia-engineering/vol/69>>. Acesso em: 05 out. 2017

GOLDRATT, E. M.; COX, J. **The goal: excellence in manufacturing**. North River Press, 1984.

HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. **A ciência da fábrica**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 720p.

LAW, A. M. Designing a simulation study: how to conduct a successful simulation study. **Proceedings of the 35th conference on Winter simulation: driving innovation**. Winter Simulation Conference, 2003. p. 66-70. Disponível em <<https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1030829>>. Acesso em: 12 jul. 2017

LITTLE, J. D.; GRAVES, S. C. Little's law. In: CHHAJED, D.; LOWE, T. J. **Building intuition**. Springer US, 2008. p. 81-100.

LUSTOSA, L. J.; DE MESQUITA, M. A.; OLIVEIRA, Rodrigo J. **Planejamento e controle da produção**. Elsevier Brasil, 2008. 357p.

MEHRJERDI, Y. Z. Six-Sigma: methodology, tools and its future. **Assembly Automation**, v. 31, n. 1, p. 79-88, 2011. Disponível em <<http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/01445151111104209>>. Acesso em: 25 set. 2017

REPORTLINKER. **Growth Opportunities in the Global Printed Circuit Board Market**. 2017. 181p. Disponível em <<https://www.reportlinker.com/p04804598/Growth-Opportunities-in-the-Global-Printed-Circuit-Board-Market.html/>>. Acesso em: 05 jun. 2017

ROBINSON, S. Simulation model verification and validation: increasing the users' confidence. In: **Proceedings of the 29th conference on Winter simulation**. IEEE Computer Society, p. 53-59, 1997. Disponível em <<http://www.informs-sim.org/wsc97papers/0053.PDF>>. Acesso em: 12 set. 2017

SADAT, S.; CARTER, M. W.; GOLDEN, B. Theory of constraints for publicly funded health systems. **Health care management science**, v. 16, n. 1, p. 62-74, 2013. Disponível em <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10729-012-9208-9>>. Acesso em: 07 out. 2017

SOKOVIC, M.; PAVLETIC, D.; PIPAN, K. Kern. Quality improvement methodologies—PDCA cycle, RADAR matrix, DMAIC and DFSS. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 43, n. 1, p. 476-483, 2010. Disponível em <[http://jamme.acmsse.h2.pl/papers\\_vol43\\_1/43155.pdf](http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol43_1/43155.pdf)>. Acesso em: 23 ago. 2017

SOUTHARD, P. B.; CHANDRA, C.; KUMAR, S. RFID in healthcare: A Six Sigma DMAIC and simulation case study. **International journal of health care quality assurance**, v. 25, n. 4, p. 291-321, 2012.

SPROULL, B. **The ultimate improvement cycle: maximizing profits through the integration of lean, six sigma, and the theory of constraints**. CRC Press, 2012.

TUBINO, Dalvio Ferrari. **Manual de planejamento e controle da produção**. Atlas, 2000. 220p

WOLFRAM. Normal Sum Distribution. 2017. Disponível em <http://mathworld.wolfram.com/NormalSumDistribution.html/>>. Acesso em: 11 out. 2017

WU, H. H. et al. Simulation and Implementation Study of Robust Drum-Buffer-Rope Management System to Improve Shop Performance. **International Journal of Humanities and Social Science**, v. 1, n. 1, 2011. Disponível em <[http://www.ijhssnet.com/journals/Vol.\\_1\\_No.\\_1\\_January\\_2011/3.pdf](http://www.ijhssnet.com/journals/Vol._1_No._1_January_2011/3.pdf)>. Acesso em: 29 out. 2017

YOUNGMAN, K. A Guide to Implementing the Theory of Constraints (TOC). 2009. Disponível em < <http://www.dbrmfg.co.nz/>>. Acesso em: 11 out. 2017



## APÊNDICE A – DADOS DE TEMPOS DE CICLO

Tempo de ciclo Corte		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	187,2	3,12
2	192,6	3,21
3	168	2,80
4	189	3,15
5	192	3,20
6	165	2,75
7	180	3,00
8	181,2	3,02
9	177,6	2,96
10	187,2	3,12
11	192,1	3,20
12	185,3	3,09
13	175,5	2,93
14	174,4	2,91
15	191,5	3,19
16	185,0	3,08
17	178,5	2,98
18	191,9	3,20
19	166,7	2,78
20	188,0	3,13
21	181,2	3,02
22	169,0	2,82
23	189,8	3,16
24	173,3	2,89
25	183,5	3,06
26	183,2	3,05
27	185,4	3,09
28	169,2	2,82
29	178,8	2,98
30	187,5	3,12
31	193,4	3,22
32	172,3	2,87
33	172,0	2,87
34	188,8	3,15
35	166,0	2,77
36	192,3	3,20
37	175,6	2,93
38	185,7	3,10
39	176,1	2,93
40	176,7	2,95
41	189,1	3,15
42	192,1	3,20
43	180,6	3,01
44	168,6	2,81
45	175,9	2,93
46	178,4	2,97
47	190,6	3,18
48	182,1	3,03
49	178,1	2,97
50	173,3	2,89
Tempo médio	181,15	3,03

Tempo de ciclo Dry Film Interno		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	36	0,60
2	33	0,55
3	37	0,62
4	34	0,57
5	38	0,63
6	37	0,62
7	39	0,65
8	40	0,67
9	42	0,70
10	38	0,63
11	33	0,55
12	30	0,50
13	39	0,65
14	42	0,70
15	37	0,62
16	39	0,65
17	38	0,63
18	34	0,57
19	41	0,68
20	37	0,62
21	41	0,68
22	31	0,52
23	30	0,50
24	41	0,68
25	40	0,67
26	40	0,67
27	40	0,67
28	33	0,55
29	41	0,68
30	34	0,57
31	40	0,67
32	36	0,60
33	35	0,58
34	42	0,70
35	32	0,53
36	32	0,53
37	31	0,52
38	32	0,53
39	39	0,65
40	40	0,67
41	40	0,67
42	36	0,60
43	40	0,67
44	30	0,50
45	36	0,60
46	39	0,65
47	35	0,58
48	33	0,55
49	37	0,62
50	38	0,63
Tempo médio	36,76	0,62

Tempo de ciclo Corrosão Interno		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	25,8	0,43
2	27	0,45
3	24,6	0,41
4	24	0,40
5	25,2	0,42
6	27,6	0,46
7	23,4	0,39
8	22,2	0,37
9	22,8	0,38
10	22,8	0,38
11	24	0,40
12	26,4	0,44
13	25,2	0,42
14	24,3	0,40
15	29,5	0,49
16	26,3	0,44
17	24,7	0,41
18	26,6	0,44
19	25,6	0,43
20	23,8	0,40
21	23,4	0,39
22	24,6	0,41
23	29,4	0,49
24	29,6	0,49
25	27,7	0,46
26	26,5	0,44
27	26,0	0,43
28	23,7	0,40
29	25,5	0,43
30	23,5	0,39
31	28,6	0,48
32	23,4	0,39
33	28,3	0,47
34	29,1	0,48
35	26,7	0,44
36	25,8	0,43
37	25,2	0,42
38	25,5	0,43
39	26,2	0,44
40	29,3	0,49
41	28,4	0,47
42	27,8	0,46
43	23,2	0,39
44	28,4	0,47
45	29,5	0,49
46	27,4	0,46
47	24,7	0,41
48	23,7	0,40
49	24,3	0,41
50	24,8	0,41
Tempo médio	25,8	0,43

Tempo de ciclo AOI Interno		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	101,6	1,69
2	108,3	1,80
3	103,7	1,73
4	90,2	1,50
5	115,9	1,93
6	106,5	1,76
7	109,2	1,82
8	102,4	1,71
9	122,5	2,04
10	115,1	1,92
11	109,5	1,83
12	111,0	1,85
13	113,3	1,89
14	112,7	1,88
15	90,7	1,51
16	99,8	1,66
17	101,4	1,69
18	112,2	1,87
19	103,0	1,72
20	106,7	1,78
21	103,0	1,72
22	109,8	1,83
23	115,1	1,92
24	98,0	1,63
25	99,3	1,65
26	107,8	1,80
27	99,0	1,65
28	104,5	1,74
29	125,6	2,09
30	105,3	1,76
31	114,5	1,91
32	114,9	1,91
33	106,1	1,77
34	108,9	1,81
35	110,2	1,84
36	110,0	1,83
37	108,3	1,80
38	112,4	1,87
39	100,0	1,67
40	114,9	1,92
41	116,7	1,94
42	113,2	1,89
43	107,9	1,80
44	109,7	1,83
45	111,5	1,86
46	115,4	1,92
47	112,3	1,87
48	98,1	1,63
49	103,9	1,73
50	110,4	1,84
Tempo médio	108,0	1,80

Tempo de ciclo Brown Oxide		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	27,9	0,46
2	26,9	0,45
3	29,0	0,48
4	30,1	0,50
5	25,5	0,43
6	26,2	0,44
7	27,3	0,46
8	30,9	0,51
9	29,4	0,49
10	27,6	0,46
11	29,2	0,49
12	27,7	0,46
13	28,5	0,48
14	24,5	0,41
15	28,9	0,48
16	30,2	0,50
17	27,3	0,45
18	27,9	0,46
19	27,8	0,46
20	26,7	0,45
21	26,6	0,44
22	25,9	0,43
23	28,9	0,48
24	26,8	0,45
25	29,2	0,49
26	27,8	0,46
27	27,7	0,46
28	25,6	0,43
29	27,2	0,45
30	30,6	0,51
31	29,0	0,48
32	28,3	0,47
33	27,4	0,46
34	29,6	0,49
35	30,6	0,51
36	28,5	0,47
37	28,1	0,47
38	24,9	0,42
39	28,0	0,47
40	26,2	0,44
41	24,1	0,40
42	26,2	0,44
43	27,3	0,46
44	27,1	0,45
45	27,4	0,46
46	27,4	0,46
47	29,7	0,49
48	29,8	0,50
49	26,8	0,45
50	28,7	0,48
Tempo médio	27,8	0,46

Tempo de ciclo Rebarbadeira		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	13,8	0,23
2	14,0	0,23
3	14,8	0,25
4	13,2	0,22
5	13,1	0,22
6	11,9	0,20
7	12,7	0,21
8	14,1	0,24
9	14,6	0,24
10	15,5	0,26
11	13,9	0,23
12	15,4	0,26
13	11,5	0,19
14	15,0	0,25
15	15,4	0,26
16	13,6	0,23
17	11,6	0,19
18	14,0	0,23
19	13,1	0,22
20	14,8	0,25
21	13,1	0,22
22	14,8	0,25
23	13,4	0,22
24	13,1	0,22
25	12,8	0,21
26	11,9	0,20
27	15,1	0,25
28	11,8	0,20
29	14,7	0,24
30	13,1	0,22
31	13,6	0,23
32	11,9	0,20
33	13,6	0,23
34	11,8	0,20
35	13,6	0,23
36	12,0	0,20
37	11,8	0,20
38	12,0	0,20
39	11,5	0,19
40	14,1	0,24
41	11,6	0,19
42	12,7	0,21
43	12,2	0,20
44	14,3	0,24
45	15,4	0,26
46	13,5	0,22
47	14,4	0,24
48	11,5	0,19
49	13,0	0,22
50	11,5	0,19
Tempo médio	13,3	0,22

Tempo de ciclo Metalização		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	840,0	14,00
Média		

Average 14

Tempo de ciclo Furação		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	10980,0	183,00
Média		

Average 183

Tempo de ciclo Simbologia		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	18,0	0,30

Fixed Esteira depende do tamanho da placa

Contorno CNC		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	2700,0	45,00

Average

Tempo de ciclo Dry Film Externo		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	61,7	1,03
2	62,0	1,03
3	50,8	0,85
4	64,3	1,07
5	74,4	1,24
6	71,4	1,19
7	71,4	1,19
8	31,3	0,52
9	32,3	0,54
10	63,0	1,05
11	75,5	1,26
12	78,7	1,31
13	69,4	1,16
14	68,5	1,14
15	56,7	0,94
16	56,8	0,95
17	83,3	1,39
18	70,2	1,17
19	66,3	1,11
20	85,3	1,42
21	75,7	1,26
22	56,0	0,93
23	102,7	1,71
24	66,3	1,10
25	84,9	1,42
26	60,0	1,00
27	64,3	1,07
28	46,4	0,77
29	53,0	0,88
30	71,0	1,18
31	95,3	1,59
32	61,1	1,02
33	63,4	1,06
34	81,7	1,36
35	55,5	0,93
36	76,9	1,28
37	54,4	0,91
38	96,0	1,60
39	71,4	1,19
40	74,3	1,24
41	85,1	1,42
42	84,6	1,41
43	84,8	1,41
44	93,5	1,56
45	82,9	1,38
46	56,2	0,94
47	66,7	1,11
48	72,4	1,21
49	89,8	1,50
50	88,4	1,47
Tempo médio	70,2	1,17

Tempo de ciclo Corrosão Externo		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	34,2	0,57
2	35,4	0,59
3	36,0	0,60
4	31,2	0,52
5	32,4	0,54
6	33,6	0,56
7	36,6	0,61
8	37,8	0,63
9	33,0	0,55
10	31,8	0,53
11	31,2	0,52
12	39,6	0,66
13	31,2	0,52
14	33,6	0,56
15	14,0	0,23
16	8,0	0,13
17	6,6	0,11
18	10,4	0,17
19	5,7	0,10
20	10,0	0,17
21	10,9	0,18
22	9,4	0,16
23	13,5	0,23
24	8,0	0,13
25	6,3	0,11
26	13,4	0,22
27	14,4	0,24
28	11,8	0,20
29	10,5	0,18
30	14,1	0,24
31	8,7	0,15
32	14,8	0,25
33	13,9	0,23
34	5,9	0,10
35	5,7	0,10
36	6,5	0,11
37	8,7	0,14
38	12,4	0,21
39	8,9	0,15
40	11,8	0,20
41	9,8	0,16
42	6,5	0,11
43	5,6	0,09
44	10,3	0,17
45	12,3	0,21
46	13,5	0,23
47	10,9	0,18
48	13,5	0,23
49	5,4	0,09
50	13,1	0,22
Tempo médio	16,9	0,28

Tempo de ciclo AOI (Externo)		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	149	2,48
2	120	2,00
3	147	2,45
4	150	2,50
5	138	2,30
6	152	2,53
7	132	2,20
8	156	2,60
9	133	2,22
10	144	2,40
11	136	2,27
12	133	2,22
13	151	2,52
14	155	2,58
15	141	2,35
16	156	2,60
17	139	2,32
18	138	2,30
19	147	2,45
20	129	2,15
21	130	2,17
22	132	2,20
23	148	2,47
24	128	2,13
25	141	2,35
26	147	2,45
27	133	2,22
28	127	2,12
29	151	2,52
30	127	2,12
31	116	1,93
32	133	2,22
33	139	2,32
34	139	2,32
35	141	2,35
36	130	2,17
37	136	2,27
38	141	2,35
39	139	2,32
40	151	2,52
41	147	2,45
42	140	2,33
43	138	2,30
44	138	2,30
45	156	2,60
46	140	2,33
47	149	2,48
48	122	2,03
49	157	2,62
50	138	2,30
Tempo médio	140	2,32

Tempo de ciclo Máscara		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	121,0	0,84
2	83,0	0,79
3	109,0	0,65
4	114,0	0,96
5	113,0	0,85
6	90,0	0,88
7	59,4	0,99
8	65,8	1,10
9	61,7	1,03
10	50,9	0,85
11	61,4	1,02
12	51,2	0,85
13	53,8	0,90
14	48,3	0,81
15	48,7	0,81
16	46,6	0,78
17	59,4	0,99
18	56,6	0,94
19	54,8	0,91
20	51,6	0,86
21	49,1	0,82
22	52,2	0,87
23	52,9	0,88
24	55,3	0,92
25	46,3	0,77
26	55,2	0,92
27	53,7	0,90
28	55,4	0,92
29	48,8	0,81
30	51,2	0,85
31	50,5	0,84
32	49,7	0,83
33	43,1	0,72
34	52,5	0,87
35	65,5	1,09
36	49,7	0,83
37	46,2	0,77
38	58,3	0,97
39	61,9	1,03
40	59,5	0,99
41	47,1	0,79
42	63,5	1,06
43	46,5	0,77
44	39,7	0,66
45	35,9	0,60
46	51,4	0,86
47	60,3	1,00
48	63,6	1,06
49	49,0	0,82
50	42,7	0,71
Tempo médio	52,8	0,88

Tempo de ciclo Teste Elétrico		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	121,0	1,28
2	83,0	0,93
3	109,0	1,05
4	114,0	1,09
5	113,0	1,01
6	90,0	1,37
7	66,9	1,12
8	56,8	0,95
9	60,8	1,01
10	51,1	0,85
11	66,0	1,10
12	80,1	1,33
13	50,6	0,84
14	61,6	1,03
15	58,9	0,98
16	73,7	1,23
17	50,6	0,84
18	34,6	0,58
19	58,0	0,97
20	71,3	1,19
21	63,5	1,06
22	59,9	1,00
23	52,8	0,88
24	65,4	1,09
25	68,4	1,14
26	55,9	0,93
27	66,0	1,10
28	61,0	1,02
29	37,5	0,62
30	70,0	1,17
31	55,4	0,92
32	36,4	0,61
33	51,0	0,85
34	64,0	1,07
35	54,5	0,91
36	49,4	0,82
37	59,2	0,99
38	58,3	0,97
39	44,9	0,75
40	57,8	0,96
41	48,9	0,82
42	53,3	0,89
43	68,1	1,14
44	91,8	1,53
45	63,1	1,05
46	56,9	0,95
47	43,3	0,72
48	46,8	0,78
49	50,5	0,84
50	59,4	0,99
Tempo médio	58,8	0,98

Tempo de ciclo OSP		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	121,0	0,31
2	83,0	0,35
3	109,0	0,31
4	114,0	0,31
5	113,0	0,32
6	90,0	0,34
7	22,0	0,37
8	19,5	0,33
9	16,4	0,27
10	20,1	0,33
11	17,2	0,29
12	20,6	0,34
13	20,5	0,34
14	20,5	0,34
15	21,7	0,36
16	20,0	0,33
17	17,1	0,28
18	19,6	0,33
19	18,6	0,31
20	21,8	0,36
21	17,7	0,30
22	17,7	0,30
23	16,5	0,27
24	19,4	0,32
25	16,7	0,28
26	21,0	0,35
27	20,7	0,35
28	18,9	0,32
29	18,8	0,31
30	20,9	0,35
31	20,5	0,34
32	19,2	0,32
33	21,2	0,35
34	22,1	0,37
35	17,1	0,29
36	22,2	0,37
37	18,1	0,30
38	19,6	0,33
39	21,0	0,35
40	17,6	0,29
41	18,6	0,31
42	20,2	0,34
43	17,2	0,29
44	17,1	0,29
45	20,5	0,34
46	17,5	0,29
47	16,3	0,27
48	16,3	0,27
49	21,2	0,35
50	18,0	0,30
Tempo médio	19,2	0,32

Tempo de ciclo CQ Final		
Nº Ciclo	Tempo (seg)	Tempo (min)
1	121,0	0,20
2	83,0	0,18
3	109,0	0,22
4	114,0	0,22
5	113,0	0,17
6	90,0	0,20
7	12,0	0,20
8	14,0	0,23
9	14,0	0,23
10	11,8	0,20
11	12,2	0,20
12	15,0	0,25
13	14,2	0,24
14	13,3	0,22
15	14,5	0,24
16	11,7	0,20
17	11,0	0,18
18	12,9	0,21
19	10,6	0,18
20	12,6	0,21
21	13,1	0,22
22	12,4	0,21
23	14,3	0,24
24	11,7	0,19
25	10,9	0,18
26	14,2	0,24
27	14,7	0,25
28	13,5	0,23
29	12,9	0,21
30	14,6	0,24
31	12,1	0,20
32	14,9	0,25
33	14,5	0,24
34	10,7	0,18
35	10,6	0,18
36	11,0	0,18
37	12,0	0,20
38	13,8	0,23
39	12,1	0,20
40	13,5	0,22
41	12,5	0,21
42	11,0	0,18
43	10,6	0,18
44	12,8	0,21
45	13,8	0,23
46	14,3	0,24
47	13,1	0,22
48	14,3	0,24
49	10,5	0,17
50	14,1	0,24
Tempo médio	12,7	0,21