

Gustavo Furtado da Silva

**PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE SISTEMAS DE
PRODUÇÃO COMPARTILHADA UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO
BASEADA EM SIMULAÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Nelson Casarotto Filho

Florianópolis, SC
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silva, Gustavo Furtado da
Procedimento para Análise de Sistemas de Produção
Compartilhada Utilizando Otimização Baseada em Simulação /
Gustavo Furtado da Silva ; orientador, Nelson Casarotto
Filho - Florianópolis, SC, 2017.
121 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção.

Inclui referências

1. Engenharia de Produção. 2. Produção compartilhada. 3. Empresas virtuais. 4. Simulação. 5. Otimização. I. Casarotto Filho, Nelson. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Título.

Gustavo Furtado da Silva

**PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE SISTEMAS DE
PRODUÇÃO COMPARTILHADA UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO
BASEADA EM SIMULAÇÃO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Florianópolis, 24 de fevereiro de 2017.

Prof. Fernando Antônio Forcellini, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Nelson Casarotto Filho, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Diego de Castro Fettermann, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Enzo Morosini Frazzon, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Pablo Felipe Bittencourt, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Esse trabalho é dedicado para você
que está lendo isto.

A GRADECIMENTOS

Os agradecimentos sempre foram minha parte favorita de uma pesquisa de grande porte, como uma monografia ou uma dissertação. É a parte do projeto que foge das normas técnicas, onde se conhece o cientista por trás da ciência e as condições que levaram ele à conclusão do trabalho.

É irônico falar isso na seção de agradecimentos, mas eu estou mais ciente que a cada dia tenho menos pessoas a quem agradecer e eu não acredito que seja algo necessariamente ruim. Em uma carta para Robert Hooke em 1676, Isaac Newton afirma que só pôde ver mais longe pois estava sobre ombro de gigantes. Essa citação se tornou uma espécie de mantra para a comunidade científica, porém quanto mais eu me envolvo com ciência, mais eu percebo que as pessoas se cegam pelo próprio *confirmation bias*. Nem todos os gigantes apontam para a direção certa e grandes influenciadores podem estar fazendo um desserviço à sociedade e à comunidade acadêmica ao divulgarem informações de fontes não-confiáveis e sem validação científica.

Dito isso, é minha obrigação reconhecer as pessoas chaves para o desenvolvimento deste trabalho:

Primeiramente e principalmente, agradeço ao meu orientador, o Prof. Dr. Nelson Casarotto Filho, que assumiu a difícil missão de me transformar em um Mestre em Engenharia

Agradeço também ao Prof. Dr. Enzo Morosini Frazzon. Suas aulas foram fundamentais para a realização deste trabalho e dos artigos publicados durante esses dois anos.

Agradeço ao corpo docente e aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSC pelos conselhos e *insights* e ao pessoal da secretaria do programa pelas várias dúvidas que foram solucionadas durante o curso.

À UFSC pela oportunidade.

À CAPES pelo dinheiro.

E finalmente, ao pessoal da Simio LLC. por fazer ressurgir meu interesse em pesquisa operacional, graças à distribuição de uma poderosa ferramenta de simulação de eventos discretos em parceria com as universidades.

“You'll be fine. You're 25. Feeling unsure and lost is part of your path. Don't avoid it. See what those feelings are showing you and use it. Take a breath. You'll be okay. Even if you don't feel okay all the time.”

(Louis C. K., 2013)

RESUMO

O mundo empresarial está tendo uma primeira ideia do que a quarta revolução industrial poderá representar, enquanto a comunidade científica está desenvolvendo novas ferramentas tecnológicas para dar suporte às indústrias durante esse período de transição. Esses avanços na tecnologia de informação têm incentivado a pesquisa em sistemas de produção compartilhada, especialmente em cenários de alta competitividade e escassez de recursos. Porém, a falta de confiança entre os parceiros é a primeira barreira atingida antes do compartilhamento da capacidade produtiva, seguida pela dificuldade de organizar os recursos produtivos em cenários de alta-complexidade, como numa rede de empresas. Esta dissertação visa uma análise do impacto do compartilhamento de recursos produtivos em redes de empresa comparando com modelos de produção tradicionais, e o desenvolvimento de um modelo computacional de otimização baseado em simulação. O modelo é construído com base no *One Product Integrated Manufacturing*, um sistema de produção que busca a otimização da eficiência de um produto através da concepção de fábricas virtuais formadas pelos melhores recursos disponíveis na rede. Alguns dos resultados encontrados, além de uma melhor eficiência geral da rede, é que fábricas virtuais dedicadas facilitam a identificação de problemas e permitem implementações pontuais de melhorias, sem impactar negativamente em outros recursos. O processo de otimização também identifica o melhor plano de produção para diferentes distâncias entre os membros da rede. Por fim, para testar a eficácia do método desenvolvido neste trabalho, o procedimento é aplicado em cenários gerados aleatoriamente e em um estudo de caso sobre internalização de processos de acabamento.

Palavras-chave: Produção Compartilhada. *One Product Integrated Manufacturing*. Empresas Virtuais. Simulação. Otimização.

ABSTRACT

The business world is having the first glimpse of what the fourth industrial revolution might represent, while the scientific community is developing new technological tools to support the industries during this transition period. These information technology advancements are encouraging researches in shared manufacturing systems, especially on high-competitiveness and low-resources scenarios. However, lack of confidence between partners is the first wall hit before productive capacity sharing, followed by the difficulty of organizing manufacturing resources in high-complexity scenarios, such as in a firm network. This dissertation aims to analyze the impact of productive resources sharing on firms networking comparing with traditional manufacturing models, and to develop a simulation-based optimization computer model. The model is built on One Product Integrated Manufacturing, a manufacturing systems that pursues the efficiency optimization of a product by designing virtual factories formed by the best resources available on the network. Some of the results found, along with a better overall network efficiency, are that dedicated virtual factories facilitate the identification of problems and allow for punctual implementations of improvements without negatively impacting other resources. The optimization process also identifies the best production plan for different distances between network members. Lastly, to test the effectiveness of the method developed in this work, the tool is applied in randomly generated scenarios and in a case study on the internalization of finishing processes.

Keywords: Shared Manufacturing. One Product Integrated Manufacturing. Virtual Enterprises. Simulation. Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Cluster</i> Virtual.....	37
Figura 2 – Desempenho de uma fábrica multiproduto.....	39
Figura 3 – Desempenho de um sistema OPIM.....	40
Figura 4 – Seleção de recursos primitivos para sistemas OPIM.....	41
Figura 5 – Integração de pequenas, médias e grandes empresas em um sistema OPIM.....	43
Figura 6 – Martelo de poliuretano reciclável da VIRTEC.....	44
Figura 7 – Resolução da pirâmide de automação com comunicação aprimorada.....	55
Figura 8 – Um <i>framework</i> para a Indústria 4.0.....	56
Figura 9 – Modelo Conceitual.....	57
Figura 10 – Metodologia de um projeto de simulação de processos.....	59
Figura 11 – Metodologia conceitual do processo de otimização baseado em simulação de um sistema de produção colaborativa.....	61
Figura 12 – Interface do <i>Simio</i>	62
Figura 13 – Modelagem da cadeia de suprimentos no <i>Simio</i>	64
Figura 14 – Construção de processos no <i>Simio</i>	65
Figura 15 – Taxa de atendimento ao cliente em função do <i>takt time</i> no modelo tradicional.....	76
Figura 16 – Comparação das taxas de atendimento dos modelos tradicional e otimizado.....	77
Figura 17 - Comparação de dois planos de produção em função dos tempos de transporte.....	82
Figura 18 – Taxa de atendimento ao cliente da sequência #12285 com capacidade dos veículos ampliada.....	84
Figura 19 – Taxa de atendimento ao cliente da sequência #10179 com capacidade dos veículos ampliada.....	85
Figura 20 – Curva de comparação entre as sequências #12285 e #10179 com a capacidade dos veículos ampliada.....	86
Figura 21 – Fluxo de produção dos condutores.....	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Modelos de ciclo de vida de empresas virtuais, segundo a literatura.....	31
Quadro 02 – Exemplos de pesquisas sobre formação de empresas virtuais	33
Quadro 03 – As quatro revoluções industriais	48
Quadro 04 – Objetos fundamentais do Simio.....	63
Quadro 05 – Tempo médio de processo de um lote de produtos em horas	66
Quadro 06 – Exemplo: Sequência de produção #00715.....	68
Quadro 07 – Exemplo: Sequência de produção #11089.....	68
Quadro 08 – Exemplo: Sequência de produção #18801.....	68
Quadro 09 – Modelo genérico da matriz de sequência de produção.....	70
Quadro 10 – Visualização dos recursos primitivos como algarismos de uma nova base numérica.....	71
Quadro 11 – Exemplo de conversão da base numérica 3 para base decimal	72
Quadro 12 – Sequência de produção #12285	76
Quadro 13 – Tempo médio de espera dos produtos no <i>buffer</i> (em horas)	78
Quadro 14 – Tempo médio de espera após aumento da capacidade do Processo 1 da Fábrica 2	79
Quadro 15 – Taxa de atendimento da demanda por tipo de produto....	80
Quadro 16 – Sequência de produção #10179	81
Quadro 17 – Taxa de utilização dos veículos em um sistema OPIM	83
Quadro 18 – Taxa de utilização dos veículos em um sistema tradicional	83
Quadro 19 – Custos dos processos de acabamento em reais por unidade	89
Quadro 20 – Dados de produção dos processos de acabamento	89
Quadro 21 – Plano de produção semanal	90
Quadro 22 – Diferença dos custos internos e externos de fabricação ...	91
Quadro 23 – Quantidade de unidades produzidas internamente e terceirizadas	92
Quadro 24 – Resultado da simulação dos modelos original e revisado	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP – Processo Hierárquico Analítico (*Analytic Hierarchy Process*)

CLP – Controlador Lógico Programável

CPS – Sistema Ciber-Físico (*Cyber-Physical System*)

EV – Empresa Virtual

PMEs – Pequenas e Médias Empresas

OPIM – Manufatura Integrada de Um Produto (*One Product Integrated Manufacturing*)

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

RFID – Identificação de Radiofrequência (*Radio Frequency Identification*)

TIC – Tecnologia de Informação e Comunicação

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 PROBLEMÁTICA	24
1.2 OBJETIVOS	24
1.3 ESTRUTURA.....	25
2 REDES DE EMPRESAS E A INDÚSTRIA COLABORATIVA.27	
2.1 EMPRESA VIRTUAL	28
2.1.1 <i>Broker</i>	29
2.1.2 Ciclo de Vida das Empresas Virtuais.....	31
2.1.3 Ferramentas de Apoio à Formação de Empresas Virtuais	33
2.2 TIPOS DE EMPRESAS VIRTUAIS	35
2.2.1 <i>Clusters</i> Virtuais	35
2.2.2 Empresas Estendidas.....	38
2.2.3 <i>One Product Integrated Manufacturing</i>	39
2.3 EXEMPLOS DE ORGANIZAÇÕES VIRTUAIS	43
2.4 <i>AGILE MANUFACTURING</i>	46
3 UM NOVO <i>FRAMEWORK</i> PARA OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO COMPARTILHADA	47
3.1 SISTEMAS CIBER-FÍSICOS E A INDÚSTRIA 4.0.....	48
3.2 INTERNET DAS COISAS	49
3.3 INDICADORES DE DESEMPENHO COOPERATIVO	50
3.4 ANÁLISE BASEADA EM SIMULAÇÃO	52
3.4.1 Simulação de Eventos Discretos	53
3.4.2 Abordagem Híbrida de Simulação-Otimização	53
3.5 O NOVO <i>FRAMEWORK</i>	54
4 ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	57
4.1 METODOLOGIA DA PESQUISA	58
4.2 MODELOS DE SISTEMAS DE COMPETIÇÃO.....	59
4.2.1 Sistema Competitivo Tradicional.....	60
4.2.2 Sistema de Produção Compartilhada	60

4.3 METODOLOGIA DA OTIMIZAÇÃO	60
4.4 SIMIO SIMULATION	62
4.4.1 Ferramentas de Modelagem.....	62
4.4.2 Dados de Produção	66
4.4.3 Otimização com <i>OptQuest</i>	67
4.5 MODELAGEM MATEMÁTICA	69
4.5.1 Sequência de Produção	70
4.5.2 Demanda e Restrições	72
5 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS COLABORATIVOS.....	75
5.1 SIMULAÇÃO DE UM CENÁRIO TEÓRICO	75
5.1.1 O problema da capacidade de produção	75
5.1.2 O problema da capacidade de transporte	80
5.2 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS GERADOS ALEATORIAMENTE	86
5.2.1 Resultados dos cenários aleatórios	87
5.3 REVISÃO DE UM PROCESSO DE ACABAMENTO REAL	88
5.3.1 Resultados para o estudo do caso real.....	91
6 CONCLUSÕES.....	95
6.1 LIMITAÇÕES DO PROJETO	96
6.2 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA.....	97
6.3 PESQUISAS FUTURAS.....	98
BIBLIOGRAFIA.....	101
APÊNDICE A – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS TEMPOS DE TRANSPORTE ENTRE FÁBRICAS.....	111
APÊNDICE B – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS GERADOS ALEATORIAMENTE	119
APÊNDICE C – COMPARAÇÃO DAS TAXAS DE ATENDIMENTO E CUSTOS DOS PROCESSOS.....	123

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Santos e Varvakis (p. 2, 1999), o aumento da competitividade global tem exercido diversas pressões nas pequenas e médias empresas (PMEs), devido a sua dificuldade ao acesso à informação e ao alcance a novos mercados. A vantagem competitiva das grandes empresas no acesso à informação e aos novos mercados acaba prejudicando a chance de sobrevivência das menores.

Tendo isso em vista, alguns autores sugerem que uma alternativa viável pode ser a formação de redes de cooperação, que além de possibilitarem a sobrevivência das pequenas e médias empresas, tornam-as capazes de competir com as grandes empresas sem perder as características que as valorizam, como flexibilidade e agilidade. Logo, vários tipos diferentes de redes de empresas, como os *clusters*, têm se formado, principalmente em países desenvolvidos (SANTOS; VARVAKIS, p. 2, 1999; ALEXANDER; TATIANA; SVETLANA, p. 71, 2013). Esses sistemas de produção colaborativa e ambientes de desenvolvimento cooperativo têm ganhado importância, especialmente para PMEs com recursos limitados (BRETTTEL et al.; p. 39, 2014).

Um dos tipos de redes colaborativas são as empresas virtuais (EVs), que são alianças temporárias de empresas criadas com o objetivo de aproveitar oportunidades de mercado, dividindo custos e compartilhando recursos e habilidades. Enquanto uma empresa tradicional é limitada por barreiras físicas, a empresa virtual é mais dinâmica e flexível, pode ser reconfigurada, otimizada e se adapta com maior agilidade às mudanças constantes do mercado (TANG et al., p. 165, 2002). Este trabalho apresentará mais especificamente o conceito de *One Product Integrated Manufacturing* (Manufatura Integrada de Um Produto – OPIM), um tipo de empresa virtual baseada em engenharia simultânea e produção compartilhada.

O OPIM foi um conceito de sistema produtivo que surgiu em meados da década de 90 através, principalmente, das publicações de Goran D. Putnik, professor da Universidade do Minho, em Portugal. Houve uma queda na quantidade de publicações sobre o tema e não se sabe se a perda de popularidade é consequência da difícil aplicação prática ou da evolução de outros sistemas produtivos. Portanto, nesta dissertação é realizada a análise dos fundamentos do sistema e qual seu potencial no cenário atual.

Em projetos de engenharia simultânea, as tarefas são geralmente independentes umas das outras e técnicas e programas de avaliação de caminhos críticos podem não ser sempre aplicáveis para estimar *lead*

times (HUANG, CHEN, p. 329, 2006). Ferramentas tradicionais de gestão foram criadas para dar suporte aos modelos tradicionais e lineares de produção e não possuem a mesma eficácia para sistemas com operações paralelas. E também, outro grande desafio de um sistema OPIM é sua aplicabilidade. São necessárias ferramentas avançadas de tecnologia de informação e um alto nível de confiança entre os parceiros envolvidos, além das dificuldades burocráticas.

1.1 PROBLEMÁTICA

Apesar de já estarmos na Era da Informação, o Brasil ainda não apresenta condições ideais para investimentos em inovação tecnológica, especialmente em cenários que o ciclo de vida dos produtos está cada vez mais curto (CALMANOVICI; p. 202-203, 2011). Isso, em conjunto com a falta de confiança entre parceiros para compartilhar informações (BRETEL et al.; p. 39, 2014; SPEKMAN & DAVIS; p. 43, 2015), impede que pesquisas mais aprofundadas em produção compartilhada sejam realizadas.

Portanto, a fim de identificar as vantagens da utilização de ferramentas tecnológicas no apoio à tomada de decisões em sistemas de produção compartilhada, este trabalho aborda alguns problemas de forma que responda à seguinte pergunta: Como a simulação pode ser usada no planejamento de fábricas virtuais que otimizem o desempenho dos recursos produtivos?

A resposta dessa pergunta pode iniciar uma revolução nos sistemas de produção colaborativos, onde o compartilhamento de capacidade produtiva não seria apenas aplicado em cenários específicos e controlados, mas seria também uma opção viável e acessível para a maioria das indústrias.

1.2 OBJETIVOS

A fim de buscar uma solução para esses problemas, essa dissertação tem o seguinte objetivo principal:

- Desenvolver um procedimento para análise de sistemas de produção compartilhada utilizando o método de otimização baseado em simulação.

O conhecimento gerado nesta pesquisa servirá como base para contribuição teórica em projetos futuros de simulação, organizações virtuais e produção compartilhada. Consequentemente, para que esse

objetivo seja atingido, uma série de objetivos específicos listados a seguir deverá ser cumprida:

- Realizar uma revisão da literatura especializada disponíveis sobre empresas virtuais e produção compartilhada, ressaltando a transformação na visão sobre o tema durante os últimos vinte anos e como a situação atual da tecnologia de informação pode alterar a aplicabilidade desses sistemas;
- Comparar os indicadores de desempenho de sistemas colaborativos aos de sistemas tradicionais, através de técnicas de simulação de processos, que permitem contornar a barreira da implementação física em empresas, com melhor eficiência e flexibilidade que ferramentas tradicionais de gestão;
- Avaliar a aplicabilidade do método de otimização baseada em simulação em cenários consideravelmente distintos.

1.3 ESTRUTURA

Após a **Introdução**, o trabalho realiza a fundamentação teórica de redes de empresas e de novos sistemas de manufatura colaborativa durante o **Capítulo 2**, focando principalmente no conceito de empresas virtuais. São levantados os tipos de empresas virtuais e alguns elementos importantes para sua formação.

Em seguida, no **Capítulo 3**, é proposta uma estrutura baseada em tecnologia de informação e comunicação para a aplicação de sistemas colaborativos de produção, utilizando conceitos recentes da Indústria 4.0. Esse capítulo busca demonstrar como a tecnologia pode ser usada para otimizar a utilização de recursos e criar novos sistemas sustentáveis.

O **Capítulo 4** apresenta o desenvolvimento de um procedimento de análise baseada em simulação-otimização. Após uma apresentação de um cenário teórico de testes e da metodologia da pesquisa, as funções do *software* utilizado e a modelagem matemática são explicadas em detalhes.

O **Capítulo 5** demonstra algumas aplicações para o método desenvolvido no **Capítulo 4**. Primeiramente são realizadas simulações do cenário teórico apresentado a fim de estudar problemas de capacidade produtiva, capacidade de transporte e propor melhorias com base nos resultados obtidos nos relatórios de simulação. Em seguida alguns cenários foram gerados aleatoriamente para que a ferramenta fosse estudada em cenários consideravelmente distintos uns dos outros.

E por fim foi feita uma revisão de um estudo de caso sobre internalização de processos de acabamento utilizando esse novo procedimento.

O trabalho é encerrado no capítulo de **Conclusões**, onde são feitas as últimas considerações sobre o projeto, listando fatores que limitaram uma maior exploração do tema e sugestões para pesquisas futuras.

2 REDES DE EMPRESAS E A INDÚSTRIA COLABORATIVA

O Capítulo 2 tratará de Empresas Virtuais e colaboração na indústria, e também apresentará um breve tópico sobre manufatura ágil, importante na construção de uma rede de fabricação.

Casarotto Filho & Pires (2001) afirmam que as pequenas empresas são normalmente mais ágeis e flexíveis que as grandes, mas muitas vezes não têm competência e escala para dominar todas as etapas da cadeia de valor. Uma grande vantagem das grandes empresas é ter condições suficientes para dominar todas essas etapas, como logística, P&D, marketing, etc. A solução pode estar na formação de redes de cooperação, onde a governança da rede passa a dominar todas as etapas da cadeia de valor e cada empresa desempenha sua função. Além de uma maior eficiência, através das redes de cooperação, as PMEs adquirem uma maior confiabilidade junto a seus clientes e ampliam o poder de negociação com as grandes empresas.

A interação de empresas cria sinergias e benefícios econômicos através do acesso compartilhado a suprimentos, distribuidores, mercados, etc. A organização da rede incentiva o desenvolvimento de relações, onde as interações dependem do comportamento dos agentes (SARACENI, p. 155, 2015).

Dentro de uma rede colaborativa, riscos podem ser balanceados e os recursos combinados podem expandir o alcance das oportunidades perceptíveis de mercado. A organização em rede multiplica as capacidades disponíveis sem a necessidade de investimentos adicionais. E consequentemente, empresas dentro de redes colaborativas podem se adaptar a mercados voláteis e encurtar o ciclo de vida de produtos com alta agilidade (BRETTTEL et al.; p. 39, 2014).

Em contraste aos vários benefícios, Spekman & Davis (p. 43, 2015) notaram que as principais barreiras para colaboração são a relutância em compartilhar informações, falta de confiança, mutualidade e simetria e desacordos em relação à divisão de benefícios, custos e riscos.

Segundo Brettel et al. (p. 39, 2014), a dissociação e separação geográfica dos processos de produção têm aumentado drasticamente a necessidade de coordenação. Para aumentar a produtividade em comparação a organizações tradicionais, as empresas e seus empregados devem se comunicar eficientemente com vários departamentos fora das fronteiras da empresa. A disponibilidade de dados de produção para todas as fábricas é um pré-requisito para a otimização geral dos processos produtivos ao longo de toda a rede.

Brettel et al. (p. 39, 2014) também afirmam que para manter uma vantagem competitiva global, as empresas deverão focar no núcleo de suas competências e terceirizar as outras atividades para os colaboradores da rede.

Nie (2015) também lembra que um elemento que é negligenciado na literatura é o custo de busca de parceiros. Através de seus estudos, Nie (2015) identifica que em certos tipos de indústria o custo de busca pode ser maior que o custo de transporte, incentivando o estudo de novos tipos de rede de empresas que explorem melhor essa informação.

Apesar destas organizações sugerirem um aumento de flexibilidade e desempenho, elas até hoje não são ubíquas na indústria. Entre outros desafios, um obstáculo para que seja estabelecida uma relação próxima entre empresas é a falta de confiança, já que os gerentes não estão acostumados a compartilhar informações críticas com outras empresas. Estudos têm mostrado que informações compartilhadas entre PMEs pode incentivar a inovação, mas podem também conduzir a um aprendizado assimétrico causado por comportamentos oportunistas. Especialmente em redes globais, diferentes mentalidades em abordar a informação e compartilhamento de custos podem resultar em altos custos de coordenação que têm levado várias iniciativas de colaboração a um fim (BRETTTEL et al.; p. 39, 2014).

2.1 EMPRESA VIRTUAL

Pithon (p. 39, 2004) afirma que o conceito de empresas virtuais (EVs) tem gerado muitas controvérsias e não há uma definição aceita universalmente. Para Brettel et al. (p. 39, 2014), são conhecidas como empresas virtuais as redes de organizações legalmente independente que compartilham competências a fim de explorar oportunidades de negócios. Camarinha-Matos e Afsarmanesh (p. 4, 2013) definem uma empresa virtual como “(...) uma aliança temporária de empresas que se juntam para compartilhar habilidades, competências e/ou recursos a fim de melhor responder às oportunidades de negócios, e essa cooperação é suportada por redes de computadores”.

Pithon (p. 43-44, 2004) resume as principais características de empresas virtuais identificadas por autores da década de 1990: As EVs baseiam-se na confiança dos parceiros, mas são independentes das empresas que as compõe e não possuem fronteiras rígidas como as empresas tradicionais. Compartilham a infraestrutura, riscos, desenvolvimento de pesquisa, recursos humanos e tecnológicos. Também podem ter o tamanho e durar o tempo necessário para que os

objetivos sejam atingidos. Para Mikhailov (p. 394, 2002), a estrutura organizacional de uma EV é orientada ao produto e utiliza *softwares* inteligentes como suporte às decisões humanas, onde o *design* dos novos produtos, a manufatura, a distribuição e as vendas estão dispersas entre vários parceiros.

Segundo uma revisão da literatura realizada por Esposito e Evangelista (2014, p.147-148), os autores pesquisados concordam em seis pontos sobre EVs: (1) seu foco é explorar as rápidas oportunidades de mercado; (2) divisão de riscos, custos e competências é o objetivo da parceria; (3) uma EV é caracterizada pela sua rede dinâmica e flexível; (4) a organização é representada pela relação entre empresas independentes; (5) a parceria é tipicamente temporária e baseada numa abordagem colaborativa *e*, (6) as ferramentas de coordenação e comunicação são baseadas em uma avançada tecnologia de informações.

Os parceiros em uma EV não apenas focam em minimizar custos e maximizar a eficiência de suas operações individuais, mas também confiam na expertise e nos recursos dos parceiros para gerenciar a cadeia de valor (KUMAR; LARSON; FRANKWICK, p. 316, 2015). Ser capaz de alavancar as competências dos parceiros da rede, a fim de responder as necessidades do mercado, pode gerar benefícios sustentáveis (BRETTTEL et al.; p. 39, 2014). Estar virtualmente conectado significa que cada membro da rede está focando em sua atividade principal para otimizar o desempenho, tendo em vista que todos os participantes da concepção do produto possuem o mesmo objetivo e têm acesso às mesmas informações.

Empresas virtuais têm as mesmas capacidades e potenciais de uma tradicional, mas são caracterizadas pelas várias outras instituições que as formam. Uma empresa virtual é uma cooperação voluntária e temporária de vários parceiros com o foco na otimização da produção de bens e na busca benefícios para todos os participantes do sistema e novas oportunidades de negócio. É uma associação de negócios independentes distribuídos geograficamente que compartilham seus recursos e esforços para atingir objetivos comuns através de atividades conjuntas (ALEXANDER; TATIANA; SVETLANA, p. 70, 2013).

2.1.1 Broker

Brokers são agentes intermediários que facilitam as transações e o fluxo de informação entre pessoas ou grupos que não possuem acesso físico a outro, ou não possuem base de confiança entre si (LONG, CUNNINGHAM & BRAITHWAITE; p. 1, 2013). Eles não possuem

nenhum processo de negócio que faça parte do projeto, produção e *marketing* do produto (SARKIS, TALLURI & GUNASEKARAN; p. 1215, 2007). Algumas das funções de um *broker* são reconhecer as oportunidades de mercado, procurar parceiros e escolher os mais competentes para formar uma empresa virtual (PITHON, p. 22, 2016).

De acordo com Long, Cunningham & Braithwaite (p. 1, 2013), redes colaborativas, por definição, buscam juntar grupos distintos para que eles possam trabalhar juntos com eficiência e sinergia. Os *brokers* podem dar suporte à transferência de conhecimento especializado entre esses grupos, otimizando a eficiência através da introdução das ideias de um grupo em outro. Sarkis, Talluri & Gunasekaran (p. 1215, 2007) lembram que é possível que uma empresa principal assuma um papel de *broker* puro, projetando e formando redes com processos de negócio de alta eficiência e vendendo os produtos sob sua própria marca.

Durante o processo de identificação de parceiros adequados, o *broker* pode realizar a pesquisa através de *databases* internos ou por catálogos *online* e *databases* públicos na *internet*. Como a seleção do melhor parceiro possível é a premissa mais importante do desenvolvimento e operação de uma empresa virtual, *softwares* de apoio à tomada de decisões para *brokers* deve oferecer suporte a esse processo, organizando e filtrando sistematicamente as informações necessárias (MIKHAILOV, p. 394, 2002).

Existem custos significantes na atuação do *broker*, pois grupos dispersos são menos eficientes em transmitir informações para todos os membros, em comparação com redes de maior “densidade”. O que significa que o *broker* se torna essencial para a transmissão de conhecimento especializado e necessita um bom apoio para funcionar corretamente, pois a quantidade de informação pode sobrecarregá-lo (LONG, CUNNINGHAM & BRAITHWAITE; p. 1, 2013). Organizações que não estão devidamente integradas às redes virtuais, se focam cada vez mais em seus próprios interesses, pois não vê o valor na relação entre os membros da EV. Logo, o *broker* tem o objetivo crítico de agregar valor individualmente a cada organização envolvida (SARKIS, TALLURI & GUNASEKARAN; p. 1216, 2007).

Segundo Putnik (2000), as atividades desenvolvidas pelo *broker* nas empresas virtuais são: (1) **seleção de recursos:** sua função é de visitar todos os elementos pertencentes ao domínio da gerência de recursos, i.e., o mercado de recursos, identificando os recursos apropriados para o serviço requerido, negociando com os candidatos e, finalmente, selecionando o melhor; (2) **reconfiguração dinâmica dos recursos:** cabe ao broker a tarefa de integrar novos recursos, i.e., novas

tecnologias, novos conhecimentos e a remoção dos recursos que não são mais necessários; (3) **monitorização dos recursos e análise de integrabilidade**: sua função é controlar a performance dos recursos, a fim de identificar eventuais falhas para poder definir políticas de negociação desses recursos; e (4) **controle dos recursos**: sua função é controlar os recursos dentro das políticas organizacionais atribuídas pelo gerente “principal” ou pelo nível de controle superior.

A seguir, o **subcapítulo 2.1.2** apresenta algumas das atividades de um *broker* em função dos estágios do ciclo de vida das empresas virtuais.

2.1.2 Ciclo de Vida das Empresas Virtuais

Pithon (p. 18-22, 2016) lista cinco modelos de ciclo de vida de novas empresas virtuais. Todos os modelos enfatizam a natureza temporária e reconfigurável das EVs, contendo quatro ou cinco fases organizadas total ou parcialmente de forma cíclica. O Quadro 1 a seguir apresenta cinco autores e suas respectivas ideias de fases do ciclo de vida de uma EV, em sequência.

Quadro 1 – Modelos de ciclo de vida de empresas virtuais, segundo a literatura.

Zimmerman (1996)	Fuchs (1997)	Merkle (1997)	Camarinha- Matos & Afsarmanesh (1997)	Putnik (2000)
Novo contexto	Pré-fase	Preparação e análise	Criação	Identificação de oportunidades
Procura	Configuração	Configuração	Operação	Contratação
Contratação	Projeto	Projeto	Modificação	Projeto e integração
Operação	Operação	Operação	Dissolução	Operação
	Dissolução			Dissolução

Fonte: Adaptado de Pithon (p. 18-22, 2016).

Em geral, todos eles propõem uma estrutura de ciclo de vida similar à definida por Mikhaïlov (p. 394, 2002) que segue cinco fases: (1) identificação; (2) formação; (3) projeto; (4) operação; e (5) dissolução. Todas essas atividades exigem inovação e inteligência humana e devem ser executadas por um agente humano, o *broker*.

Na **fase de identificação**, um *broker* procura e reconhece oportunidades de mercado, planejando a formação de uma nova empresa virtual. Analisando os novos requisitos do mercado, o *broker* pode estimar custos e receitas, os tipos de parceria e cadeias de empresas.

A principal tarefa do *broker* na **fase de formação** é encontrar as organizações com potencial para realizar atividades, satisfazer os requisitos e a arquitetura organizacional identificada na fase anterior, e selecionar os parceiros mais adequados para formar a empresa virtual.

A **fase de projeto** especifica procedimentos detalhados para o cumprimento da missão, incluindo projeto de novos produtos, desenvolvimento dos fluxos de materiais e informação, sistemas de informação, compromissos e transações entre os parceiros da EV.

Durante a **fase de operação**, um *broker* programa e sincroniza os planos operacionais dos parceiros. O *broker* não está diretamente envolvido nas atividades dos parceiros, porém serve de moderador, monitorando o progresso e resolvendo conflitos entre os membros da EV.

Por último, na **fase de dissolução**, a atividade principal do *broker* é arquivar a documentação da missão, distribuir todos os dados e informações relacionadas aos parceiros e providenciar serviços de pós-venda aos clientes.

A empresa virtual é uma organização temporária com relações de curto prazo entre os parceiros, apenas dentro da missão. Normalmente a EV é projetada com o objetivo de fabricar um tipo particular de produto ou entregar um tipo particular de serviço. Quando o mercado desse produto ou serviço declina, a EV se dissolve, permitindo que os parceiros encontrem novas oportunidades de negócio. O *broker* pode procurar informações em fontes especializadas de informação, como análises de mercado, fóruns e websites das empresas. Ele também desenvolve os requisitos para potenciais novos produtos e parceiros, estimando todas as habilidades e competências necessárias para satisfazer esses requisitos e planeja a arquitetura organizacional das novas EVs (MIKHAILOV, p. 394, 2002).

2.1.3 Ferramentas de Apoio à Formação de Empresas Virtuais

A seleção de parceiros ágeis, competentes e compatíveis é o fator chave na formação de empresas virtual, conforme enfatizado por vários pesquisadores (MIKHAILOV, p. 394, 2002), que pode ser vista pela quantidade de pesquisas sobre diferentes ferramentas de seleção de parceiros adequados no estabelecimento de alianças dinâmicas utilizando fatores quantitativos e/ou qualitativos (YE & LI, p. 9351, 2009).

Parte das pesquisas utiliza um método conhecido como *Analytic hierarchy process* (AHP), uma técnica baseada em matemática e psicologia para organizar e analisar decisões complexas, especialmente em tomadas de decisões em grupos.

O AHP divide o processo de decisão em “estruturação do problema”, “mensuração das prioridades locais” e “cálculo das prioridades globais”. O processo de decisão é estruturado hierarquicamente em diferentes níveis, onde cada nível consiste em um número finito de elementos de decisão. O nível superior da hierarquia representa o objetivo geral, enquanto o nível inferior consiste nas alternativas que serão escolhidas. Os níveis intermediários contêm os critérios de decisão (MIKHAILOV, p. 395-396, 2002).

O Quadro 2 a seguir apresenta diversas ferramentas de apoio ao processo de tomada de decisão de seleção de parceiros para a formação de empresas virtuais. A seleção de parceiros é um tema amplamente estudado, principalmente em teoria dos jogos, e pode ser aplicado em diferentes setores. Os autores e artigos listados são apenas alguns exemplos de diferentes períodos, desde os anos 80 até os mais recentes.

Quadro 2 – Exemplos de pesquisas sobre formação de empresas virtuais.

Talluri & Baker	1996	Programação de duas fases para resolver problemas de seleção de parceiros na formação de EVs, onde os fatores de custo, tempo e distância são considerados.
Wang, Ip & Yung	2001	Algoritmo genético baseado em decisões difusas para obter a solução para seleção de parceiros com restrição de tempo em uma EV onde os subprojetos formam uma rede de precedência.
Ip et al.	2003	Algoritmo genético baseado em regras para problemas de seleção de parceiro em função do risco.

Zeng, Li, & Zhu	2006	Modelo de programação inteira não-linear para um problema NP-completo de seleção de parceiros com restrições de tempo.
Kasilingam & Lee	1996	Modelo de programação inteira mista para seleção de vendedores e quantidades de pedidos, considerando custos de compra, transporte, dos vendedores e baixa qualidade dos produtos.
Talluri et al. Dean & Schniederjans	1999 1991	Modelagem matemática baseada em um método de programação linear para problemas de decisões multicritérios.
Babic & Plazibat	1998	Análise multicritério para classificação de empresas em função da eficiência de negócio, composto por indicadores econômicos e de eficiência usados em análises financeiras.
Ossadnik	1996	Método AHP para unir parceiros alocando sinergias de acordo com o impacto de seus potenciais desempenhos, usando critérios como inovação, rede de distribuição, equipamentos e qualidade dos funcionários.
Narasimahn Nydick & Hill Partovi et al.	1983 1992 1989	AHP para problemas de avaliação e seleção eficaz de fornecedores, lidando com critérios simples, qualitativos e quantitativos.
Meade et al.	1997	<i>Analytic Networking Process (ANP)</i> , uma forma geral do AHP que não exige uma estrutura hierárquica, e a teoria da utilidade para justificar relações estratégicas, impulsionado por estratégias corporativas.
Ye & Li	2009	Problema de seleção de parceiros com intervalo de valores na formação de EVs sob informações incompletas.
Tam & Tummala	2001	Aplicação do AHP em um processo de tomada de decisão em grupo para o problema de seleção de fornecedores.
Mikhailov	2002	Método modificado do AHP baseado em julgamento de comparação ao invés de valores numéricos exatos.
Hsieh & Lin	2012	Sistema de pregões baseado em tecnologia <i>Web Service</i> , que consiste em funções como pedido de proposta, submissão de ofertas e determinação do vencedor.
Cummings & Holmberg	2012	<i>Framework</i> de seleção dinâmica de parceiros que inclui um análise de quatro fatores críticos de sucesso da aliança.

Zhang et al.	2013	Algoritmo genético que utiliza um método de Pareto otimizado, onde o tomador de decisão escolhe a solução de acordo com suas necessidades.
Rezaei	2015	Abordagem de seleção onde não apenas os compradores avaliam os fornecedores, como também os fornecedores têm a oportunidade de avaliar os compradores.

Fonte: Própria (2016).

Mikhailov (p. 395, 2002) conclui, a partir de sua revisão da literatura, que o processo de seleção de parceiros deve ser considerado um problema de tomada de decisões de múltiplos critérios, ao invés de um problema puro de modelagem matemática. Já Ye & Li (p. 9351, 2009) afirma que esses métodos tradicionais assumem que o tomador de decisão utiliza valores precisos em seu julgamento, quando na realidade os tomadores de decisões estão inseguros de suas preferências, devido a informações incompletas e incertas sobre os candidatos e seus desempenhos.

Durante a formação de empresas virtuais, vários fatores em função da oportunidade de mercado devem ser levados em consideração, como custo, qualidade, confiabilidade, crédito e tempo de transporte (WU & SU, 2005). Outra questão importante é que vários tomadores de decisão estarão avaliando simultaneamente os candidatos, transformando a seleção de parceiros em uma análise de múltiplos atributos em conflito (YE, LI, p. 9351, 2009). O método clássico de AHP é também reconhecido por muitos dos pesquisadores mencionados, apesar de surgir o mesmo problema em utilizar valores exatos na formulação dos critérios da AHP (MIKHAILOV, p. 395, 2002).

2.2 TIPOS DE EMPRESAS VIRTUAIS

2.2.1 *Clusters* Virtuais

O conceito de *cluster* foi popularizado por Michael E. Porter e tem se tornado o foco de muitas ações de eficiência colaborativa, programas governamentais e desenvolvimento regional. *Cluster* industrial, também chamado de *cluster* empresarial, é uma localização geográfica onde os recursos propiciam o desenvolvimento de empresas do mesmo ramo através de aumento de produtividade e inovação tecnológica (PORTER, 1990).

Atualmente, os problemas de desenvolvimento dos *clusters* têm sido pesquisados com maior ênfase por ser uma das poucas formas sustentáveis de aumentar a competitividade de mercado e uma grande dificuldade nas pesquisas sobre o tema é identificar todos os elementos que devem ser considerados que, segundo Sarach (p. 170-171, 2015) são pessoas, infraestrutura, inovação e conhecimento.

O Distrito Industrial italiano é uma forma de cluster, normalmente integrado a governos provinciais. Esse cluster pode conter consórcios de empresas que as unem em objetivos comuns. Um cluster calçadista pode conter consórcios de fabricantes de caçados, ou de fabricantes de equipamentos para a indústria calçadista, todos na mesma microrregião. Por vezes o cluster de uma província pode ter um único consórcio e se confundir com ele (caso de vinhos italianos). Mas o consórcio é a forma jurídica com que as empresas de um cluster (ou distrito industrial) podem se associar. Esses consórcios normalmente são permanentes (CASAROTTO & PIRES, 2001).

Clusters e empresas virtuais apresentam muitas similaridades, mas segundo Santos e Varvakis (p. 10-11, 1999), não se deve ignorar o fato de que se tratam de dois tipos distintos de redes de empresas. Os dois tipos apresentam igualdade e confiança mútua entre os parceiros, são criados a partir de oportunidades de negócios que beneficiam todos os membros e competências e recursos são compartilhados visando o objetivo comum do sistema.

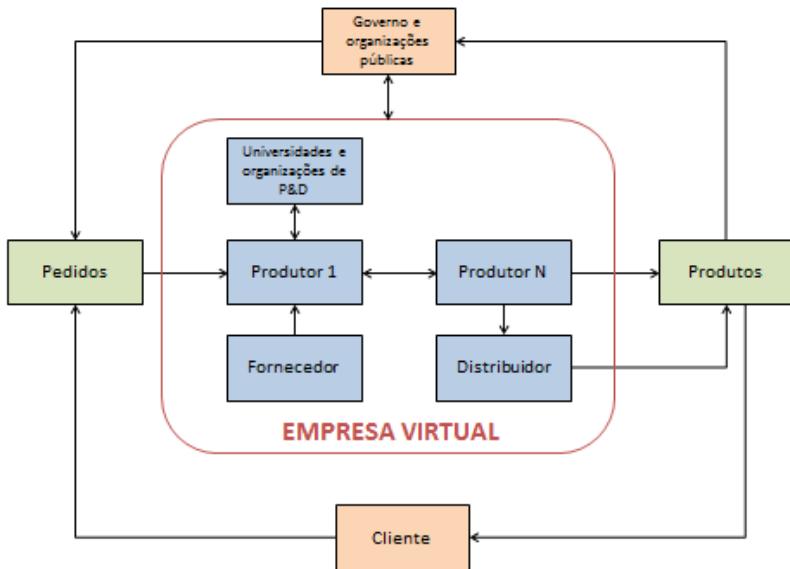
Porém, a principal diferença entre *clusters* e empresas virtuais é a distância geográfica entre os integrantes. Os parceiros em um *cluster* utilizam a proximidade geográfica entre eles para explorar os recursos, infraestrutura e demanda de uma determinada região. Em compensação, os participantes de uma empresa virtual estão conectados através da tecnologia de informação e comunicação, o que permite a realização de ações colaborativas mesmo com uma grande distância entre eles.

Nos últimos anos, o avanço tecnológico possibilitou o desenvolvimento de novos sistemas gerenciais, em que o impacto da dispersão geográfica dos recursos possa ser minimizado. Alexander, Tatiana e Svetlana (2013) propõem um método de criação de *clusters* industriais em forma de empresas virtuais a partir da ideia de que as vantagens competitivas das empresas virtuais auxiliam no cumprimento dos objetivos dos *clusters*, como redução dos custos de produção e transação, colaboração de recursos, aumento da atividade inovadora e desenvolvimento de novas tecnologias.

A Figura 1 apresenta a visão de Alexander, Tatiana e Svetlana (p. 70, 2013) de como uma empresa virtual pode ser representada como um

cluster industrial, onde os participantes compartilham seus recursos, conhecimentos e tecnologias para atingir resultados melhores, mais baratos e rápidos.

Figura 1 – *Cluster Virtual*.



Fonte: Traduzido de Alexander, Tatiana e Svetlana (p. 70, 2013).

Nesse modelo, o cliente interage apenas com uma das empresas, geralmente a responsável pela busca de clientes, *marketing* e suprimentos. A empresa virtual também pode interagir fornecedores de matéria-prima, instituições de pesquisa, universidade, agências do governo e instituições financeiras, assim como em um *cluster* tradicional. Esse tipo de dinâmica pode gerar as seguintes vantagens (ALEXANDER; TATIANA; SVETLANA, p. 71, 2013):

- Coordenação eficaz no cumprimento de objetivos e projetos conjuntos;
- Redução do custo total de produção de bens e serviços;
- Redução dos custos de negociação, informação e comunicação;
- Maior recebimento de subsídios e benefícios do governo;
- Adaptação flexível a mudanças do ambiente;
- Desenvolvimento de novas tecnologias e atividades inovadoras;

- Facilidade para entrar em novos mercados.

2.2.2 Empresas Estendidas

O termo empresa estendida é atribuído a Tom Stallkamp, ex-diretor de compras e CEO da Chrysler, a fabricante americana de automóveis. O termo foi usado para descrever a relação que a Chrysler tinha com sua base de fornecedores enquanto ele estava na empresa, onde os fornecedores eram tratados como aliados ao invés de adversários, que era prática comum por décadas na indústria automobilística americana (SPEKMAN & DAVIS; p.43, 2015).

Segundo Browne (1995) e Pithon (2004), a empresa estendida é um termo frequentemente usado na literatura para representar o alto nível de interdependência que existe entre as organizações, não somente na indústria de fabricação, mas também em outras áreas de negócios, como financeira e transporte, e é muitas vezes confundida com o conceito de empresa virtual. Na Empresa Estendida, as funcionalidades do produto principal são fornecidas separadamente por companhias diferentes que se juntaram para fornecer ao cliente um produto ou serviço definido. A Empresa Estendida é uma rede de diferentes companhias ao longo da cadeia de fornecedores, ou de valor agregado, portanto, a concorrência não é mais entre companhias, mas entre cadeia de fornecedores.

Browne (1995) identifica as principais características das empresas estendidas: (1) a empresa de fabricação concentrou-se em suas atividades de negócios e técnicas principais, e terceiriza as atividades de negócios secundárias a fornecedores externos e fornecedores de serviço; a terceirização encoraja a habilidade competitiva do fabricante e de seus fornecedores e aumenta a dependência mútua deles; e (2) o fabricante desenvolve relacionamentos a longo prazo com seus clientes principais e trata-os como importantes sócios nos negócios.

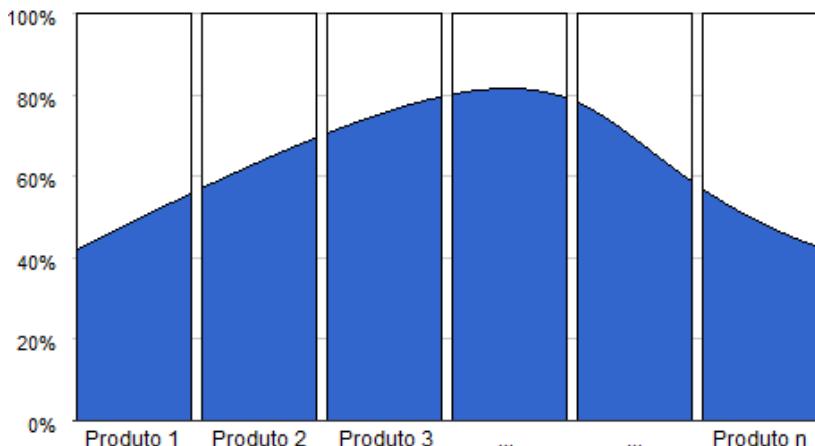
A literatura mais recente de Spekman & Davis (p. 43, 2015) afirma que as mudanças na competitividade durante as últimas duas décadas têm demonstrado que uma abordagem competitiva é menos eficiente que uma colaborativa e que a filosofia das empresas estendidas está emergindo entre as multinacionais. Para alguns autores, o termo “cadeia de suprimentos colaborativa” vem substituindo o termo “empresa estendida”, pois os dois possuem os mesmos princípios.

2.2.3 One Product Integrated Manufacturing

De acordo com Putnik e Silva (p. 46, 1995), as fábricas projetadas para produzir vários produtos são tecnicamente menos eficientes comparadas a fábricas dedicadas a um único produto, onde o nível de desempenho atinge o seu máximo.

A partir desta premissa, surge o conceito de *One Product Integrated Manufacturing* (OPIM), um conceito organizacional para sistemas de manufatura com o propósito de otimizar a fabricação de um determinado produto. É uma ideia recente em relação a outros sistemas de manufatura e explora algumas características de empresas estendidas, ágeis e virtuais para maximizar a eficiência e capacidade produtiva. A Figura 2 mostra que o desempenho em uma fábrica tradicional varia de produto para produto dependendo da forma como os recursos são utilizados.

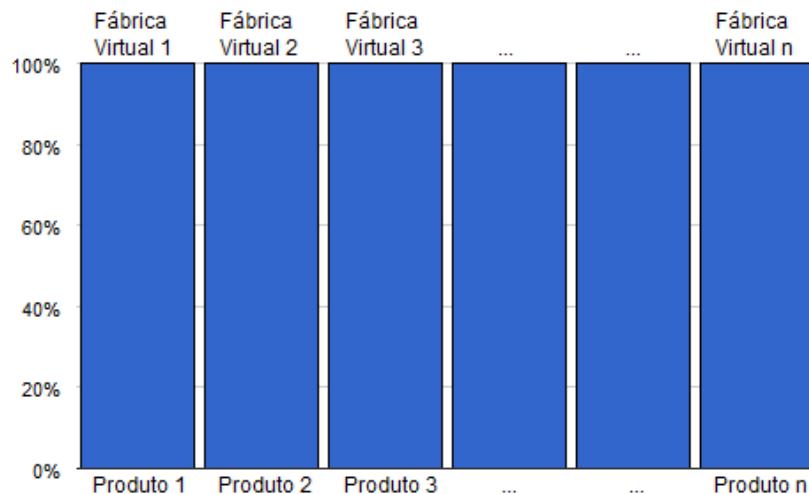
Figura 2 – Desempenho de uma fábrica multiproduto.



Fonte: Putnik & Silva (p. 48, 1995).

Já a Figura 3 apresenta a premissa de um sistema OPIM, onde cada produto possui sua própria fábrica com desempenho otimizado devido a utilização de recursos dedicados. Essas fábricas dedicadas são chamadas de “fábricas virtuais”, devido sua organização temporária e variável (PITHON, p. 41-42, 2004).

Figura 3 – Desempenho de um sistema OPIM.

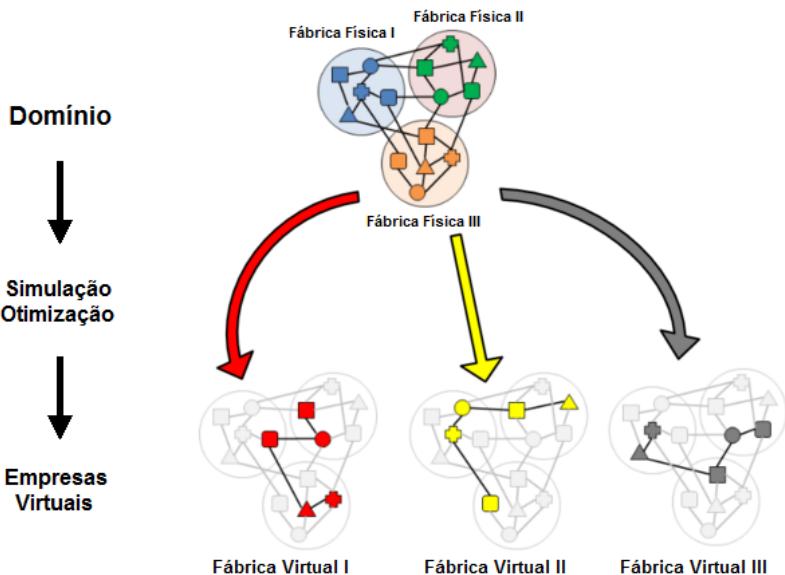


Fonte: Putnik & Silva (p. 48, 1995).

Os processos responsáveis pela produção do produto podem ser divididos em tarefas ou elementos que são reorganizados de uma forma mais eficiente. Essas tarefas, chamadas de “recursos primitivos”, podem estar distribuídas globalmente em empresas distintas, formando uma rede de empresas que conecta seus recursos primitivos através de uma tecnologia de transmissão de dados (CUNHA & PUTNIK, p. 43, 2006).

O conjunto de empresas e seus recursos primitivos é chamado de “domínio”. Quanto maior for a amplitude do domínio, maior será a gama de soluções possíveis para um produto, porém também exigirá melhores tecnologias de apoio a decisão em estruturas mais complexas e reconfigurações em tempo real (PUTNIK & SILVA, p. 48, 1995). A Figura 4 demonstra o processo de seleção de recursos primitivos de um domínio para a formação de uma série de fábricas virtuais dedicadas a um produto cada – um sistema OPIM.

Figura 4 – Seleção de recursos primitivos para sistemas OPIM.



Fonte: Adaptado de Cunha & Putnik (p. 44, 2006).

Putnik e Silva (p. 49, 1995) afirmam que cada célula de recurso primitivo é especializada em um tipo de serviço – *design*, planejamento, gerenciamento e manufatura – e que o resultado do sistema OPIM deve possuir o melhor desempenho para o produto dentro do conjunto de células possíveis. Com o uso de tecnologias de informação, as funções de *design*, planejamento e gerenciamento são independentes da distância entre os recursos.

Entre os benefícios de um sistema OPIM para as empresas estão a reengenharia dinâmica dos processos de negócio e o fortalecimento da competitividade através do acesso a novos recursos, serviços e conhecimentos de outras empresas da rede, além da descentralização e melhor distribuição do negócio. Microempresas e empreendedores individuais podem se beneficiar do OPIM ao se integrarem em redes de empresas de maior porte, aproveitando a cadeia logística e de produção para se desenvolver mesmo estando instalado em fábricas de baixo investimento.

Uma grande quantidade de pequenas empresas dedicadas em cada recurso primitivo do produto pode oferecer menores preços e maior

qualidade de produtos, competitividade e flexibilidade. Porém uma série de dificuldades está associada aos sistemas OPIM, como questões legais e econômicas, propriedade intelectual, aplicações em tempo real de ferramentas de tecnologia e informação e a transformação do conhecimento da empresa (PUTNIK & SILVA, p. 50-51, 1995).

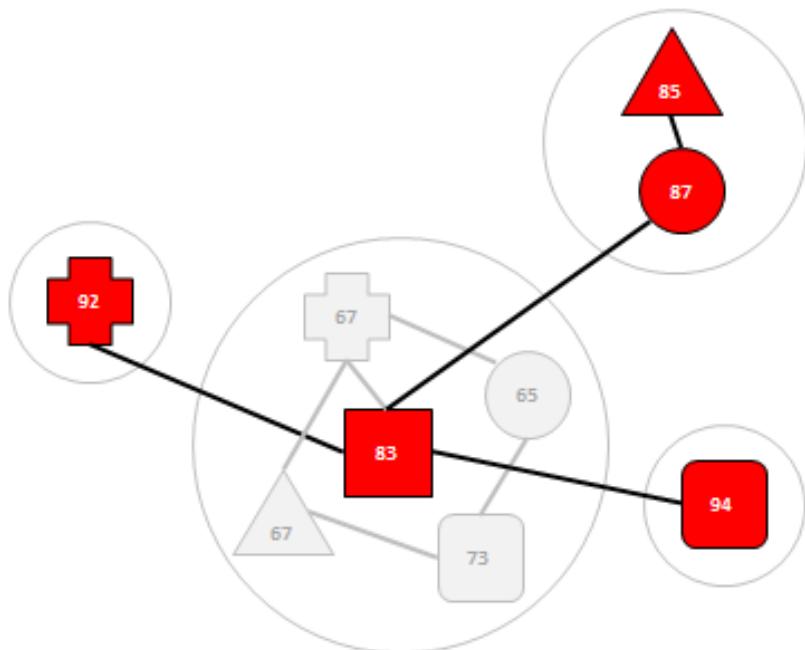
Putnik e Silva (p. 50-51, 1995) mencionam brevemente as vantagens de um sistema OPIM para empreendedores individuais, porém não mencionam claramente as vantagens para grandes empresas de possuir microempreendedores em sua rede.

Menores empresas geralmente possuem um foco maior no *core business*, o que garante uma maior eficiência de suas atividades. Grandes empresas não possuem a mesma eficiência produtiva, mas compensam com grandes redes de relacionamento e cadeia de suprimento. O sistema OPIM tem a proposta de aproveitar as vantagens de empresas de qualquer porte através de uma integração sem barreiras físicas.

A Figura 5 a seguir demonstra as vantagens desta integração para PMEs, grandes empresas e até empreendedores que gerenciam apenas um recurso primitivo. Cada forma geométrica é um tipo de recurso primitivo diferente necessário para a concepção de um produto, onde as formas vermelhas fazem parte da fábrica virtual de um produto específico, as formas desfocadas são recursos cuja eficiência está abaixo do resultado ótimo para o produto e os números dentro das formas representam a eficiência para aquele produto.

Pequenas empresas muitas vezes podem possuir maiores eficiências, porém encontrar dificuldade em produzir e distribuir o produto completo. A maior empresa da rede, geralmente atuará como o elo entre os recursos, obtendo em troca uma produção mais eficiente e de melhor qualidade através do esforço cooperativo dos parceiros envolvidos. Se cada empresa física focar no micro-objetivo de aprimorar suas atividades, o macro-objetivo da empresa virtual será alcançado caso a informação que circula pelas conexões entre recursos seja sincronizada em tempo real.

Figura 5 – Integração de pequenas, médias e grandes empresas em um sistema OPIM.



Fonte: Própria (2016).

2.3 EXEMPLOS DE ORGANIZAÇÕES VIRTUAIS

Na Europa, esses conceitos são tema de muitos estudos e atualmente há uma tendência de transição de conexões físicas para *clusters* conectados virtualmente a fim de aumentar a competitividade e agilidade na economia. Todavia, na Rússia por exemplo, *clusters* de empresas virtuais praticamente não existem devido à falta de legislação, infraestrutura e baixa eficiência das instituições (ALEXANDER; TATIANA; SVETLANA, p. 71, 2013). Logo, mais fatores influenciam no sucesso de sistemas de gestão colaborativa em comparação a sistemas tradicionais, enfatizando a dificuldade de implantação.

No Brasil, o único caso documentado em periódicos científicos de uma empresa virtual é a VIRTEC, formada por nove pequenas e

médias empresas de tecnologia da cidade de São Carlos, SP. O caso foi estudado principalmente por Carlos F. Bremer da Universidade de Engenharia de São Carlos – USP e inclui empresas das áreas de metalurgia, eletrônica, cerâmica, polímeros, mecatrônica, *softwares* e serviços de exportação (BREMER et al., p, 215, 2001).

Um exemplo dos benefícios competitivos desta iniciativa foi o desenvolvimento de novos produtos, como um martelo de poliuretano reciclável mais leve, barato e com maior ciclo de vida. O sucesso do produto, posteriormente vendido na Europa e Estados Unidos, só foi possível devido ao rápido e flexível ciclo de pesquisa e desenvolvimento que surgiu do aproveitamento das melhores competências disponíveis entre os parceiros (BREMER et al., p, 217, 2001).

Figura 6 – Martelo de poliuretano reciclável da VIRTEC.



Fonte: Bremer et al., p, 217, 2001.

A VIRTEC foi criada a partir de um sistema chamado VISHOF, em que o *broker* (o responsável pela manutenção e organização do sistema) busca empresas para formação de *clusters* e identifica oportunidades de negócios para a formação de empresas virtuais (BREMER, 1999) e todos os parceiros têm acesso a um sistema

integrado via *internet* através de qualquer navegador. Um *framework* similar foi aplicado em um *cluster* de indústrias de plástico no México, onde seis pequenas e médias empresas do setor formaram uma empresa virtual chamada VIRPLAS com o objetivo de encontrar novas oportunidades de negócio (BREMER; MOLINA; ORTEGA, p. 5-6, 2000).

Hoje, dezembro de 2016, os *websites* dessas duas empresas virtuais se encontram fora do ar, apesar do sucesso a nível internacional há 20 anos. Isso pode representar uma das duas características de empresas virtuais: (1) a dificuldade de gerenciamento das operações e coordenação entre os parceiros; (2) a natureza temporária desse tipo de iniciativa, que é dissolvida após a conclusão da meta.

Santoro e Bifulco (2005) e Witczyński e Pawlak (2005) apresentam pesquisas realizadas com organizações virtuais ativas no final da década de 90, com o objetivo de identificar os fatores de sucesso em todo o ciclo de vida da organização, desde a busca dos parceiros até a dissolução. Mais de uma década após a publicação original destas pesquisas, algumas das plataformas de colaboração continuam ativas, como a *Design & Reuse* (design-reuse.com), *Virtuelle Fabrik* (virtuellefabrik.ch), *Silicon Integration Initiative* (si2.org) e a *RosettaNet* (que mudou seu domínio para gs1us.org). Esses exemplos de sucesso são justificados por suas frequentes atualizações tecnológicas e investimentos em marketing e comunicação entre os parceiros.

Outros exemplos de Santoro e Bifulco (2005) e Witczyński e Pawlak (2005), ainda ativos durante o período das publicações originais, não possuem nenhum registro de atividades recentes, que é o caso de projetos como *Global Engineering Networking*, *MOSCITO*, *E-COLLEG*, *Kuba VE*, *SCOP VE*, entre outras. A dificuldade em rastrear essas informações é consequência de uma baixa exposição da proposta e um baixo investimento em tecnologia de informação e comunicação, o que pode ser uma das falhas do projeto, pois uma plataforma *online* de integração entre empresas em pontos geográficos distintos deveria expor de forma clara e manter um registro de fácil acesso às políticas de colaboração.

Um fenômeno similar é observado no caso da Cutters, Inc. de William Epstein (KANET, 1998; KANET et al., 1999). O grupo possui a maioria das características para ser considerada uma organização virtual: todos os membros são independentes, compartilham competências e possuem um objetivo comum, porém a tecnologia de informação não é o elemento central que possibilita a cooperação entre os parceiros. Epstein, o *broker* da organização, afirmou não ter afinidade

com tecnologia (KANET et al., p. 32, 1999) e, apesar das várias sugestões feitas pelo autor da pesquisa sobre a Cutters, Inc., não há mais registros de atividades da organização desde a publicação do artigo há 16 anos.

2.4 AGILE MANUFACTURING

Para complementar o **Capítulo 2**, será apresentada uma rápida visão da *agile manufacturing*, por ser um conceito muito importante para a criação de redes de manufatura. O conceito, utilizado em empresas, também pode ser utilizado em redes empresas.

Agile manufacturing ou manufatura ágil, tem chamado a atenção de pesquisadores e praticantes por ser vista como evolução dos sistemas de manufatura existentes, como o *lean manufacturing*. As atuais práticas da manufatura estão mudando o foco da produção em massa para uma produção ágil e flexível (DUBEY & GUNASEKARAN; p. 2147, 2015).

Para Costantino (p. 451, 2012), *agile manufacturing* foi desenvolvido para satisfazer a demanda por produtos de baixo volume e alta variedade, o que é possível graças à flexibilidade e reconfigurabilidade obtidas através da integração de sistemas de computação, *hardware* e fluxos de informação.

Já de acordo com as definições levantadas por Pithon (p. 15-16, 2016), *agile manufacturing* é um sistema de fabricação com capacidades de satisfazer às necessidades de um mercado mudando rapidamente. É um sistema que muda rapidamente entre modelos de produtos ou entre as linhas, em resposta em tempo real para a demanda do cliente, onde os aspectos mais relevantes são (1) a resposta rápida às oportunidades de mercado; (2) a adaptabilidade ou a capacidade para mudar a direção; (3) as corporações virtuais; e (4) a reconfigurabilidade de recursos corporativos para responder a inesperadas oportunidades de mercado.

Um fator que viabiliza o conceito de *agile manufacturing* tem sido o desenvolvimento das tecnologias de suporte a manufatura que permite vendedores, projetistas e o chão de fábrica compartilhar um banco de dados comum de peças, produtos e capacidades produtiva, enquanto até então, segundo a pesquisa de Sarkis, Talluri e Gunasekaran (2007), não haviam ferramentas que oferecessem um suporte adequado para a seleção de parceiros para formação de empresas virtuais ágeis.

3 UM NOVO FRAMEWORK PARA OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO COMPARTILHADA

As primeiras pesquisas sobre *One Product Integrated Manufacturing* (OPIM) começaram a ser publicadas há aproximadamente 20 anos atrás por Goran D. Putnik, porém desde então não houve muito progresso sobre o tema. O conteúdo disponível mais recente é em grande parte republicações ou citações dos antigos artigos de Putnik. As causas desse fenômeno podem ser a extrema complexidade em implantar esses sistemas e reproduzi-los em estudos de casos, ou o foco da comunidade científica estar voltada para outros sistemas produtivos considerados mais eficientes ou práticos.

Porém, o tema “empresas virtuais” é mais estudado, e publicações recentes são mais facilmente encontradas. Para Pithon (p. 48, 2004) e Cunha e Putnik (p. 25, 2006), sistemas OPIM são considerados um modelo de EV, logo o conhecimento disponível sobre esse tema pode ser utilizado como suporte a uma futura exploração mais aprofundada sobre sistemas OPIM.

Estudando a literatura, é perceptível que a dependência tecnológica é mencionada em todas as pesquisas sobre empresas virtuais. O nível de comunicação *online* e a capacidade de processamento dos computadores cresceram rapidamente nas últimas décadas a uma taxa de 58% ao ano (HILBERT & LÓPEZ, p. 63, 2011), facilitando a obtenção de uma fábrica virtual OPIM em tempo real dentro de um amplo domínio de recursos, pois as principais ferramentas de suporte a esse sistema ainda não estavam desenvolvidas o suficiente quando se iniciaram as pesquisas sobre o tema.

A mais importante ferramenta de TIC é a internet, que tem sido identificada como um poderoso instrumento para a gerenciamento de sistemas distribuídos e de tecnologias como os identificadores de rádio frequência (*radio frequency identification – RFID*). A internet também pode ser utilizada para rastrear produtos individuais ao longo da cadeia de processo (BRETEL et al.; p. 37-38, 2014).

Tendo em vista esse novo cenário tecnológico, este trabalho propõe um novo *framework* para os sistemas OPIM no contexto da Indústria 4.0 e discute as vantagens do uso de análises baseadas em simulação nesse *framework*. Para isso, é necessária a conceituação das seguintes tendências industriais: (1) Sistemas ciber-físicos e a Indústria 4.0, (2) Internet das coisas, (3) Indicadores de desempenho cooperativo e (4) Métodos de simulação-otimização.

3.1 SISTEMAS CIBER-FÍSICOS E A INDÚSTRIA 4.0

As três revoluções industriais anteriores foram iniciadas por inovações tecnológicas: (1) a introdução de máquinas movidas a vapor para mecanizar a produção no final do século XVIII, (2) o uso de energia elétrica na produção em massa e a divisão do trabalho no começo do século XX e (3) a introdução de controladores lógicos programáveis (CLP) na automatização e revolução digital da produção na década de 1970 (INDUSTRIE 4.0 WORKING GROUP; p. 13-14, 2013; SCHWAB; 2016).

De acordo com especialistas em pesquisa industrial, a próxima revolução industrial será iniciada pela internet, permitindo a comunicação entre humanos e máquinas em sistemas ciber-físicos (*cyber-physical systems – CPS*) ao longo de extensas *networks* (BRETTTEL et al.; p. 37, 2014). Para Schwab (2016), as transformações de hoje não são uma mera transformação da Terceira Revolução Industrial, mas sim a chegada da Quarta, devido à velocidade, o escopo e o impacto nos sistemas, onde são inúmeras as possibilidades de bilhões de pessoas conectadas por dispositivos móveis e tecnologias emergentes, como inteligência artificial, robótica, veículos autônomos, impressão 3D, etc.

Quadro 3 – As quatro revoluções industriais.

Revolução	Ano	Informações
1	1786	Vapor, água, equipamentos mecânicos de produção
2	1870	Divisão de trabalho, eletricidade, produção em massa
3	1969	Eletrônicos, TIC, produção automatizada
4	?	Sistemas ciber-físicos

Fonte: Schwab (2016)

Sistema ciber-físico é definido como a tecnologia de gerenciamento de sistemas interconectados pelos seus recursos físicos e sua capacidade computacional (LEE et al., p.18, 2015) que possibilitam a comunicação entre humanos, máquinas e produtos similares, além autocontrolar certas atividades conforme eles adquirem e processam dados (BRETTTEL et al., p. 38, 2014).

Para Wang et al. (2015), CPS é a integração dos processos computacionais e físicos, onde os computadores monitoram e controlam

os processos físicos, recebendo e enviando *feedback* respectivamente. Logo, a computação e a comunicação são utilizadas para adicionar novas competências aos sistemas físicos.

Recentemente, as pesquisas em CPS estão sendo aplicadas em áreas como transporte, cirurgias robóticas, casas inteligentes, aviação, pontos críticos de infraestrutura, etc. (WANG et al., 2015). Lee et al. (p.18, 2015) acredita que a aplicação dos CPSs na produção, logística e serviços nas práticas industriais atual criará uma Indústria 4.0 com significante potencial econômico.

Atualmente, Indústria 4.0 é um termo popular para descrever as mudanças eminentes no cenário industrial, particularmente na indústria de produção e manufatura dos países desenvolvidos. Mas o termo ainda é usado em diferentes contextos e necessita de uma definição explícita (BRETTTEL et al.; p. 43, 2014).

Segundo Brettel et al. (p. 38, 2014), a indústria 4.0 tem o objetivo de estabelecer processos de produção e produtos inteligentes. Na manufatura do futuro, fábricas têm que lidar com a necessidade de um rápido desenvolvimento de produtos, de uma produção flexível e de ambiente complexos.

No futuro, as inovações tecnológicas da Indústria 4.0 irão conduzir a uma redução de custos em transporte e comunicação e a um aumento de eficiência e produtividade em toda a cadeia de suprimentos, abrindo novas oportunidades de mercado. Irão criar novas formas que atender as necessidades existentes e romper a antiga cadeia de valor industrial (SCHWAB, 2016).

3.2 INTERNET DAS COISAS

Internet das Coisas é uma arquitetura de informações via internet para facilitar a troca de bens e serviços (WEBER & WEBER, p. 1, 2010). É a conexão de uma rede objetos inteligentes (XIA et al., p. 1101, 2012) com o propósito de providenciar uma infraestrutura de troca de informações segura e confiável e eliminar a lacuna dos objetos no mundo físico e sua representação nos sistemas de informação (WEBER & WEBER, p. 1, 2010).

Internet das Coisas é baseada na visão de que a conexão de objetos físicos à internet torna possível o acesso a dados remotos e o controle do mundo físico à distância e que a mistura de dados coletados de várias fontes distintas com os dados disponíveis na rede possibilita o surgimento de serviços “sinergéticos” com maior potencial comparado aos serviços isolados (KOPETZ, p. 307, 2011). Isso também abre

oportunidades de novas aplicações para melhorar a qualidade de vida, o que atraiu a atenção de vários pesquisadores ao redor do mundo (XIA et al., p. 1101, 2012).

Segundo Wang et al. (p.5, 2015), Internet das Coisas é um tipo de sistema ciber-físico que envolve fortemente a internet. É a capacidade de comunicação sem fio integrada a sensores e computadores, permitindo que coisas únicas e identificáveis providenciem dados para a internet sem a necessidade de interação humana. A Internet das Coisas tem a visão de ir além da comunicação básica para vincular a “cloud” com coisas reais que carreguem informações, como localização, *status* e dados de negócios.

Recentemente, as ferramentas de tecnologia *cloud* têm mudado a maneira de se pensar em serviços de TIC e têm inspirado inovações em vários sistemas de manufatura. Manufaturas baseadas em *cloud* auxiliam a criação de sistemas ciber-físicos capazes de oferecer serviços em tempo real, digitalmente e fisicamente. Além do armazenamento de dados, os recursos físicos integrados com a tecnologia *cloud* geram uma manufatura adaptável, segura e em tempo real (WANG et al., p.5; 2015).

3.3 INDICADORES DE DESEMPENHO COOPERATIVO

Estudar antigos casos é uma importante ferramenta para o planejamento de projetos futuros. Isto permite identificar como os elementos do sistema se comportam em determinado cenário e prever o resultado das ações realizadas durante a implantação do projeto. Além disso, a simulação é outra ferramenta de suporte a pesquisas e projetos de sistemas complicados que não podem ser validados por modelos analíticos exatos, onde variáveis estocásticas e incertezas são relevantes para o resultado final (KELTON et al., p. 8-9, 2011).

Robinson (p. 13-16, 2014) lista uma série de vantagens da simulação na análise de operações de sistemas. Entre elas estão menores custos e tempo de experimentos em comparação com sistemas reais, total controle das condições, modelagem da variabilidade e de restrições, além de ser possível simular sistemas que ainda não existem no mundo real. Simulação é uma ferramenta que gera conhecimento estimulando a criatividade e o pensamento sistêmico, o que a torna ideal para o estudo de teorias relativamente recentes, como empresas virtuais e produção compartilhada.

Antes de iniciar a etapa de modelagem e simulação, é necessário definir o objeto de estudo e os objetivos que se busca alcançar. Busi e Butitci (2006) identificam algumas lacunas na situação atual das

empresas virtuais e apontam suas necessidades de pesquisa. Alguns exemplos são:

- Entender as dinâmicas de empresas colaborativas para desenvolver ferramentas de colaboração e técnicas de gerenciamento;
- Estudar as operações de processos estendidos (processos entre empresas), pois os sistemas gerenciais tradicionais não suportam esse tipo de interação;
- Desenvolver indicadores de *performance* colaborativa para avaliar o desempenho de toda a rede;
- Desenvolver tecnologias de gerenciamento integradas e interoperáveis entre os parceiros.

Galdámes et al. (p. 139-140, 2009) propõe um sistema de medição de desempenho para arranjos produtivos baseado em cinco perspectivas que pode facilmente ser adaptado para medir o desempenho de organizações virtuais. Durante o desenvolvimento e a implantação do sistema de medição, é necessário estabelecer um conjunto de normas, métodos estatísticos de análise de dados, infraestrutura e ferramentas para garantir a coleta, manutenção e integração das perspectivas, que são:

- Perspectiva econômica-social: arrecadação de impostos, número de empresas e trabalhadores;
- Perspectiva do meio-ambiente: desperdício de matéria-prima, consumo de energia;
- Perspectiva do desempenho das empresas: produtividade, competitividade;
- Perspectiva da eficiência coletiva: ganhos e ações coletivas;
- Perspectiva do capital social: nível de confiança e cooperação das empresas.

Outro método mais analítico para mensurar desempenho, descrito em Ramanathan (2014), utiliza parâmetros contábeis, de informação e de produção para elaborar cinco fatores de colaboração: (1) objetivos de negócios financeiros, (2) objetivos de negócios operacionais, (3) processos da cadeia de suprimentos, (4) compartilhamento de informação e (5) grau de colaboração. A amplitude de uma rede de empresas possibilita análises a partir de pontos de vista distintos, onde vários indicadores podem ser usados para calcular o desempenho do sistema.

3.4 ANÁLISE BASEADA EM SIMULAÇÃO

Simulação é uma ferramenta com a função de imitar um processo ou um sistema do mundo real (BANKS et al.; p. 3, 2001). Para simular algo, primeiro é necessário que seja desenvolvido um modelo que represente as características principais ou os comportamentos de determinado sistema, físico ou abstrato. Enquanto o modelo representa o próprio sistema, a simulação representa as operações no sistema em função do tempo.

A simulação pode ser utilizada em muitos contextos, como simulação de tecnologia para otimização de desempenho, engenharia de segurança, treinamentos, educação e jogos eletrônicos. A simulação também pode ser usada para estudar as funcionalidades de um sistema natural ou humano, pode ser usada para demonstrar os efeitos de condições alternativas durante uma ação, assim como pode ser usada quando o sistema real não pode ser aplicado, por ser perigoso, inacessível, não estar pronto, ou simplesmente não existir (SOKOLOWSKI; BANKS; p. 6, 2009).

A manufatura representa uma das mais importantes aplicações da simulação, pois está técnica é uma ferramenta valiosa usada por engenheiros para avaliar os efeitos do capital investido em equipamentos e instalações físicas, como fábricas, armazéns e centros de distribuição. A simulação pode ser utilizada para prever o desempenho de um sistema planejado e comparar soluções alternativas para algum problema de projeto (BENEDETTINI; TJAHHONO; 2009). Outro importante objetivo da simulação em sistemas de manufatura é quantificar o desempenho do sistema. Banks et al. (2005) cita as medidas de desempenho mais comuns para simulação de sistemas de manufatura:

- Rendimento sob demanda média ou picos de demanda;
- Tempo de ciclo do sistema;
- Utilização de recursos, máquinas e mão-de-obra;
- Gargalos;
- Filas e atrasos;
- Estoque necessário;
- Mão-de-obra necessária;
- Eficácia de sistemas de planejamento;
- Eficácia de sistemas de controle.

3.4.1 Simulação de Eventos Discretos

Simulação de sistemas produtivos é utilizada principalmente para examinar os efeitos de melhorias ou investimentos em um sistema produtivo através de planilhas estáticas contendo tempos de processo e transporte. Porém, uma das técnicas de simulação mais sofisticada é a simulação de eventos discretos, que possui a vantagem de poder simular eventos dinâmicos de um sistema produtivo. Essa dinâmica do sistema produtivo depende das variações nos processos de manufatura, tempos de montagem, *setups* das máquinas, quebras, refugo e pequenas paradas (ERIKSSON; 2005). Existem vários *softwares* para simulação de eventos discretos com a mesma fundação, porém focam em diferentes mercados e pode possuir funcionalidades distintas.

A simulação de eventos discretos modela a operação de um sistema como uma sequência discreta de eventos no tempo. Cada evento ocorre em um instante particular no tempo e marca uma mudança no estado do sistema (STEWART; 2004). Entre eventos consecutivos, se assume que nenhuma mudança no sistema tenha ocorrido, logo a simulação pode pular no tempo diretamente de um evento para o próximo. Isso permite que a simulação de eventos discretos seja executada muito mais rapidamente que as simulações contínuas.

3.4.2 Abordagem Híbrida de Simulação-Otimização

Otimização de processos é uma das principais ferramentas quantitativas para tomada de decisões industriais. É utilizada no ajuste de processos em que uma série de parâmetros específicos são otimizados sem violar as restrições do sistema, onde os objetivos mais comuns são a minimização de custos e maximização de rendimento e/ou eficiência.

Durante a otimização, é necessário que uma ou mais especificações do processo sejam maximizadas, enquanto todas as outras se mantenham dentro das restrições. Isso pode ser feito através de ferramentas de mineração de processos que descobrem gargalos e atividades críticas para que a otimização seja aplicada apenas neles.

Modelos de otimização por programação linear têm o objetivo de minimizar o custo total de um horizonte de planejamento fixo, onde as restrições mais comuns são balanços de estoque, nível de produção, demanda e restrições de capacidade em cada período do horizonte de planejamento (BYRNE & HOSSAIN, p. 225, 2005). Já a simulação estocástica é uma poderosa ferramenta de modelagem para análise de sistemas complexos antes de sua implementação física e um método

capaz de especificar com precisão sistemas logicamente complexos e variáveis e constantes não-algébricas (LIN & CHEN, p. 105, 2015).

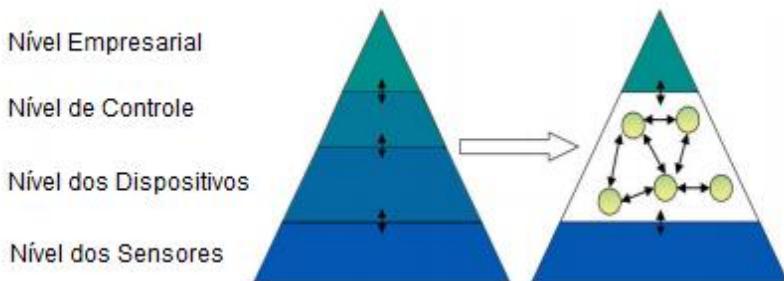
Porém, além disso, existem métodos híbridos de simulação e otimização capazes de mensurar as incertezas no planejamento da produção sem comprometer a precisão das informações ou o tempo de processamento do computador. Otimização baseada em simulação é definida como uma otimização estocástica utilizando técnicas de simulação, ou o processo de identificar o melhor valor das variáveis de entrada sem uma avaliação explícita. É uma ferramenta de apoio à decisão capaz de detectar a interação entre várias entidades de um sistema complexo real para identificar a melhor solução (LIN & CHEN, p. 105, 2015).

3.5 O NOVO *FRAMEWORK*

A agilidade de uma rede de empresas depende tanto da habilidade de rastrear o fluxo de mercadorias, quanto de rastrear os dados relativos à confiabilidade de entrega e satisfação do cliente. Os avanços em TIC têm permitido o monitoramento de uma grande quantidade de dados de produção em tempo real.

A tecnologia RFID pode ser usada não apenas para rastrear a situação e posição de bens, mas também pode conter as instruções de trabalho para controlar e registrar o processo de produção de toda uma cadeia de fornecimento. Como o preço dos sensores tem caído significativamente nos últimos anos, existe uma grande quantidade de dados que pode ser adquirida no chão-de-fábrica. Esses dados poderão ser acessados através de uma rede online, ajudando a aprimorar a comunicação entre diferentes níveis hierárquicos, conforme demonstrado na Figura 7 a seguir (BRETEL et al.; p. 39-40, 2014).

Figura 7 – Resolução da pirâmide de automação com comunicação aprimorada.



Fonte: Brettel et al.; p. 39, 2014.

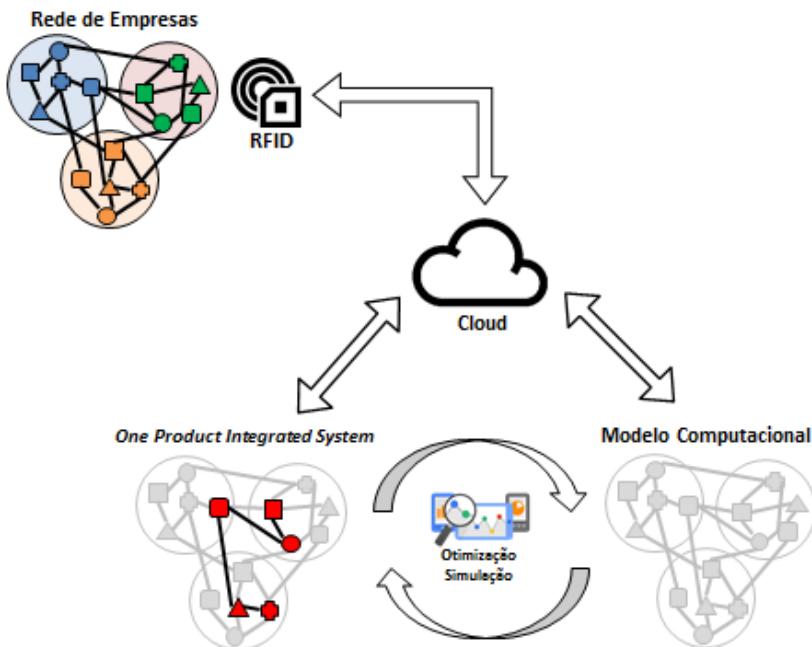
Em um sistema de produção compartilhada baseada na internet, todas as empresas e seus recursos primitivos estão conectados a servidores que realizam a integração entre as empresas através da análise e transmissão de dados em tempo real. Os setores administrativos recebem e enviam *feedback* através de sistemas de informação compartilhados entre os parceiros da rede, enquanto os recursos físicos, como máquinas ou produtos, realizam esse envio e recebimento de dados através de sensores, como códigos de barras ou etiquetas RFID.

Na Indústria 4.0, cada elemento físico do sistema possui sua contraparte virtual. Um universo virtual é modelado a partir dos dados coletados pelos sensores e sistemas de informação. Esse universo é a ferramenta básica de gestão e planejamento da manufatura, onde as estruturas físicas e suas conexões são modeladas e analisadas através de procedimentos de otimização e simulação.

Essas ferramentas de otimização são aplicadas ao modelo para identificar as mais eficientes fábricas virtuais dedicadas a um produto a partir de restrições como demanda, capacidade dos recursos e tempo de transporte. Já as ferramentas de simulação são utilizadas na previsão do comportamento das fábricas virtuais criadas durante o processo de otimização, como *lead times*, identificação de gargalos e testes de hipóteses considerando as variáveis estocásticas do sistema.

Tudo isso é apresentado na Figura 8 a seguir que representa um *framework* para a aplicação de procedimentos de simulação-otimização em sistemas OPIM no contexto da Indústria 4.0. Todo processo de análise e gerenciamento está conectado à “Cloud” (Internet das Coisas) sincronizando o mundo físico e o computacional. Esse conjunto de sistemas físicos e computacionais é chamado de “sistema ciber-físico”.

Figura 8 – Um *framework* para a Indústria 4.0.



Fonte: Própria (2016).

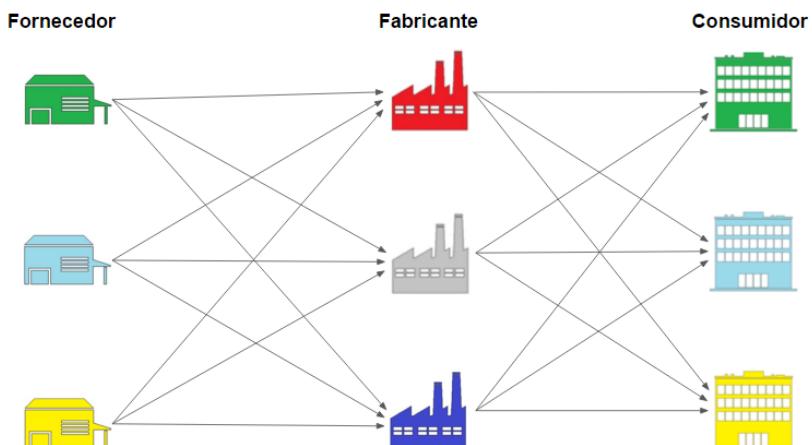
A Indústria 4.0 criará um “mundo inteligente e conectado”, com uma maior flexibilidade, robustez e melhores padrões de qualidade para engenharia, planejamento, manufatura e processos logísticos e operacionais, onde a Internet das Coisas estará presente em todas as áreas fundamentais. Novos modelos de negócios e parcerias surgirão com o objetivo de atender o mais recente requisito dos consumidores. Esses modelos irão permitir que PMEs entrem em uma rede de empresas e desfrutem de serviços e sistemas que eles não poderiam pagar sob o atual modelo de negócios (INDUSTRIE 4.0 WORKING GROUP; 2013). No futuro, os CPS serão aplicados em fábricas que se auto-organizam com um controle consciente do contexto e do ambiente (WANG et al., 2015). A simulação terá a importante função de servir como interface entre o universo físico e o virtual.

4 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Este capítulo aborda a metodologia de pesquisa, modelos conceituais e o desenvolvimento do procedimento de reconfiguração de recursos primitivos em redes de empresas. O sistema exemplificado neste capítulo consiste em três fábricas que produzem linhas de três produtos e cada produto possui um cliente final e um fornecedor de matéria-prima. A aplicação e análise do procedimento deste exemplo são vistas em seguida no **Capítulo 5**.

Antes de se tornar um produto final, a matéria-prima precisa passar por três processos distintos que podem ser realizados em qualquer uma das três fábricas. Todos os fornecedores possuem seu veículo para transportar a matéria-prima para as fábricas, assim como cada fábrica possui um veículo para transportar o produto acabado para o cliente e eventualmente produtos semiacabados entre as fábricas.

Figura 9 – Modelo Conceitual.



Fonte: Própria (2016).

O fator relevante para a análise é que uma fábrica possui especialidades e competências diferentes das outras, o que significa que um processo específico pode ser mais eficiente em uma determinada fábrica ou uma fábrica pode ter mais experiência em uma determinada etapa da manufatura de um produto. Os sistemas de produção colaborativa têm o intuito de explorar a expertise dos parceiros e

maximizar a eficiências produtiva, portanto a simulação dos sistemas tem o objetivo de identificar a maneira mais eficiente de explorar esses recursos.

A simulação de processos também considera as variáveis estocásticas do sistema. Neste caso, a estocasticidade está presente nos tempos de manufatura dos produtos, na demanda e no tempo de viagem dos veículos. Mesmo que o tempo entre um pedido e outro seja igual ao tempo médio de manufatura desses pedidos, gargalos e períodos de ociosidade impedem que o sistema produtivo consiga atender a demanda.

Durante este **Capítulo 4** da abordagem metodológica e a seguir no **subcapítulo 5.1** será utilizado esse modelo teórico 3x3x3 (3 fábricas, 3 processos e 3 produtos) por ser modelo relativamente simples e ao mesmo tempo prover informações suficientes para uma análise informativa. Como é visto nos próximos capítulos, um sistema 3x3x3 possui uma quantidade alta suficiente de *inputs* e *output* para que possam ser observadas tendências de comportamento, mas não alta suficiente a ponto de comprometer o tempo de processamento computacional e, consequentemente, o tempo de realização deste trabalho.

4.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

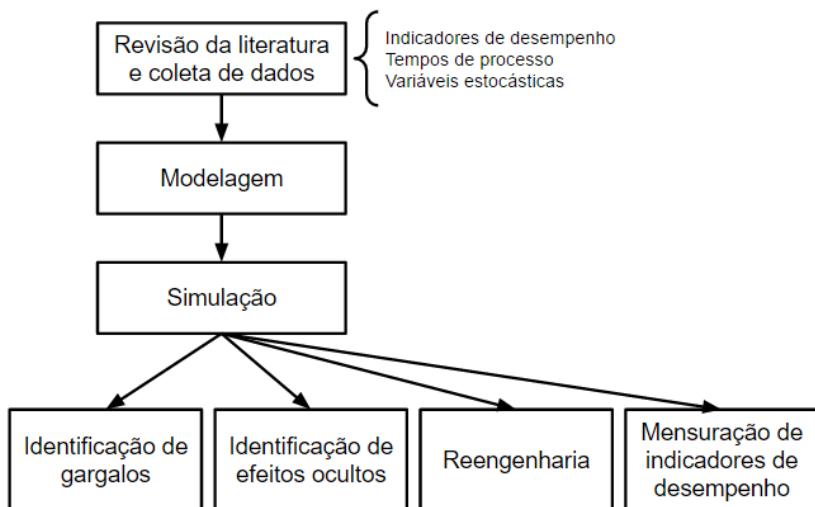
A pesquisa realizada neste trabalho tem objetivo exploratório (GIL; 2010), pois visa proporcionar uma visão geral das redes de produção compartilhada após o levantamento bibliográfico em periódicos científicos.

A simulação de eventos discretos tem seu procedimento classificado como experimental e laboratorial, pois explora o objeto de estudo em um ambiente controlado. O trabalho é realizado utilizando um método indutivo com abordagem de documentação direta, quantitativa e qualitativa. A partir da análise de dados quantitativos específicos de alguns casos, obtêm-se conclusões mais amplas para todos os cenários (GIL; 2010). Por fim, o **Capítulo 5** põe em prática o procedimento desenvolvido durante o **Capítulo 4** através de um estudo de caso.

A Figura 10 apresenta uma proposta de metodologia de simulação de processos de uma empresa virtual, uma adaptação do modelo de Azadeh et al. (p. 289, 2012). A revisão da literatura contém, além da conceituação dos termos e do estado-da-arte, a identificação das lacunas através de estudo de casos e da teoria. A partir destas informações, são

estipulados parâmetros e desenvolvidos indicadores para avaliação do desempenho do sistema e dos objetivos do projeto. O modelo de simulação tem a função de monitorar o comportamento desses indicadores baseado nos *inputs* definidos pela revisão bibliográfica, auxiliando na previsão dos resultados sem a necessidade de investimentos na construção de um sistema real.

Figura 10 – Metodologia de um projeto de simulação de processos.



Fonte: Adaptado de Azadeh et al. (2012).

Com o intuito de testar a eficiência de um sistema colaborativo baseado em *One Product Integrated Manufacturing*, os dois modelos a seguir serão simulados e comparados.

4.2 MODELOS DE SISTEMAS DE COMPETIÇÃO

Aqui se abordará o sistema competitivo tradicional, onde as empresas fabricantes são independentes, e o sistema no qual empresas compartilham a produção.

4.2.1 Sistema Competitivo Tradicional

Neste modelo, os clientes escolhem aleatoriamente um fabricante que ficará responsável por todos os três processos daquele lote de produtos. Ou seja, uma fábrica é completamente independente das outras e sua maior preocupação é atender a demanda estocástica.

Isso pode ser visto como um modelo tradicional, onde os três fabricantes competem dentro de um mesmo mercado. Apesar de estarem produzindo os mesmos produtos com a mesma qualidade, as diferentes competências de cada fabricante geram diferentes níveis de eficiência produtiva. São três fornecedores e clientes neste exemplo, um para cada produto específico, porém modelar uma cadeia de suprimentos com um número maior ou menor de fornecedores e clientes segue a mesma lógica de programação. A maior diferença seriam as rotas que os veículos escolhem que possuirão distâncias diferentes, impactando na disponibilidade dos veículos e, consequentemente, na capacidade de atendimento dos fabricantes. Assim como também é possível alterar a quantidade de fabricantes, veículos e tipos de produtos dependendo da necessidade do trabalho.

4.2.2 Sistema de Produção Compartilhada

O modelo seguinte tem a função de analisar o comportamento de um sistema cooperativo de produção em que os três fabricantes operam sob uma mesma marca e têm funções específicas para cada produto. Esse modelo cooperativo possui os mesmos *inputs* do modelo competitivo tradicional, com exceção da sequência de produção. Enquanto no modelo tradicional o produto segue através dos três processos da fábrica escolhida pelo cliente, no modelo cooperativo os produtos seguem uma rota específica podendo passar por qualquer dos três fabricantes. Essa rota busca otimizar a taxa de atendimento ao cliente tendo como restrições a capacidade de produção e transporte dos recursos.

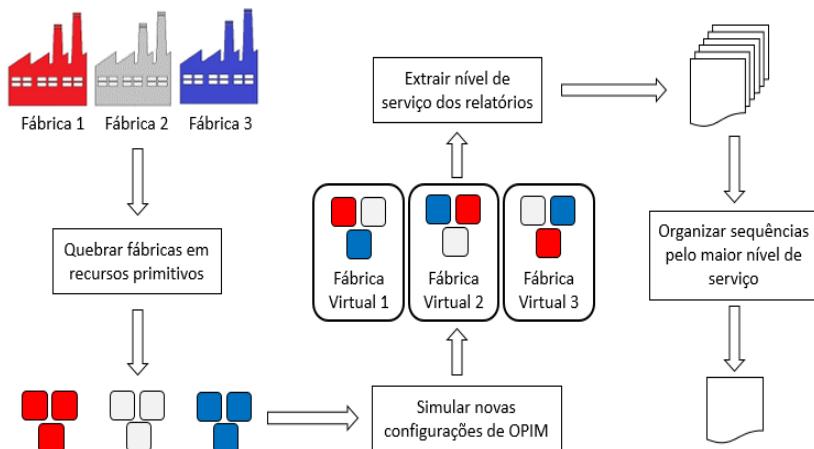
As próximas páginas irão explanar a metodologia da pesquisa e as ferramentas do Simio utilizadas na construção destes modelos, seguido pelos resultados iniciais obtidos nas primeiras simulações.

4.3 METODOLOGIA DA OTIMIZAÇÃO

A Figura 11 a seguir apresenta como é realizado o processo de otimização de um modelo OPIM baseado em simulação. Após

identificar os recursos primitivos das três fábricas, o software de simulação reorganiza esses recursos formando uma fábrica virtual para cada produto e calcula o nível de atendimento da fábrica. Esse processo de simulação dura uma fração de segundo e, quando termina, os recursos são reorganizados novamente em uma diferente configuração e um novo nível de atendimento da demanda é calculado.

Figura 11 – Metodologia conceitual do processo de otimização baseado em simulação de um sistema de produção colaborativa



Fonte: Própria (2016).

Essas iterações têm a função de testar todas as configurações possíveis de fábricas virtuais antes de uma delas ser escolhida para a implementação real. Explorando os relatórios de resultados, são retirados importantes indicadores para a análise de melhoria, como nível de serviço e utilização da capacidade de cada cenário, além de alguns fatores que alteram os valores desses indicadores.

O **subcapítulo 4.4** a seguir explica as funcionalidades do *software* utilizado na análise e a construção do modelo computacional. Os **subcapítulos 5.1.1 e 5.1.2** buscam evidenciar e interpretar o comportamento de sistemas de produção compartilhada, focando na reconfiguração de processos e redimensionamento dos tempos de transporte, utilizando a metodologia explicada anteriormente na Figura 11.

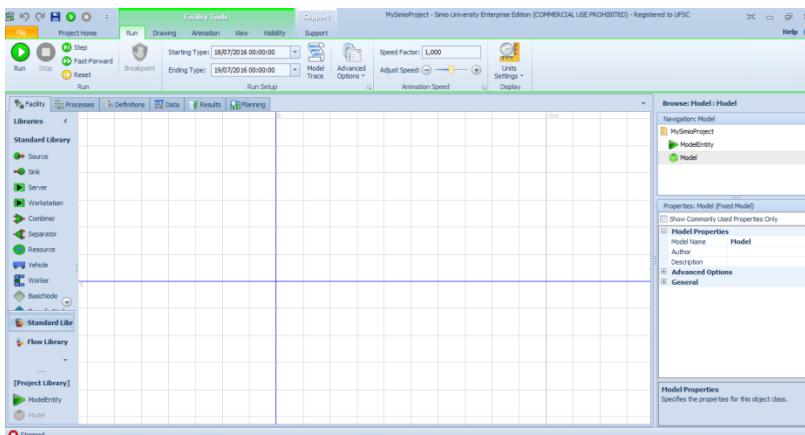
4.4 SIMIO SIMULATION

Simio Simulation (SIMIO LLC.; 2016) é um *software* de modelagem e simulação que permite construir e rodar modelos dinâmicos e animados em 3D de diversos sistemas, como fábricas, cadeias de suprimento, departamentos de emergência, aeroportos e sistemas de serviços. O *Simio* emprega uma abordagem baseada em objetos para modelagem, onde modelos são construídos a partir da combinação de objetos que representam componentes físicos do sistema. Por exemplo, é possível construir uma linha de produção adicionando objetos que representem as máquinas, empilhadeiras, esteiras, etc. (PEGDEN & STURROCK; p. 2, 2012).

Apesar de existir outros *softwares* capazes de realizar a análise pretendida, o *OptQuest* (OPTTEK SYSTEMS, INC.; 2016) integrado ao *Simio* são uma eficiente e intuitiva solução para problemas de otimização em cenários estocásticos. Essas ferramentas permitem análises avançadas sem a complexidade da programação devido a interface simplificada e integração de tecnologia visual 3D, tornando-se ideal para a aplicação neste trabalho.

4.4.1 Ferramentas de Modelagem

Figura 12 – Interface do *Simio*.



Fonte: Extraído do *software* Simio Simulation, da Simio LLC (2016).

A Figura 12 apresenta a interface do *Simio*, que possui um sistema de abas dinâmicas que se adapta em função do objeto selecionado, similar ao *Microsoft Office*. À esquerda está a biblioteca de objetos padrões que são utilizados na construção do modelo. Cada objeto tem uma função e irá representar um componente do sistema estudado neste trabalho, conforme explicado no Quadro 4 a seguir.

Quadro 4 – Objetos fundamentais do Simio.

Objeto	Imagen	Descrição	Representante
<i>Source</i> Fonte		Tem a função de gerar entidades no sistema. É onde são definidas as distribuições de tempo em que as entidades são geradas.	Fornecedores de matéria-prima
<i>Server</i> Servidor		É um processo que segura as entidades durante um tempo especificado. As entidades aguardam nos buffers caso o server não possua capacidade disponível.	Processos de transformação dentro da fábrica
<i>Sink</i> Fossa		Destroi as entidades que já atravessaram por todos os processos necessários para que não interfiram mais no sistema.	Centros de distribuição para o cliente final

Fonte: Própria (2016).

Esses três objetos são fundamentais para a construção do modelo. Com eles é possível criar uma base para a modelagem da rede de empresas, como mostrado na Figura 13, seguindo a proposta do modelo conceitual apresentado anteriormente na Figura 9.

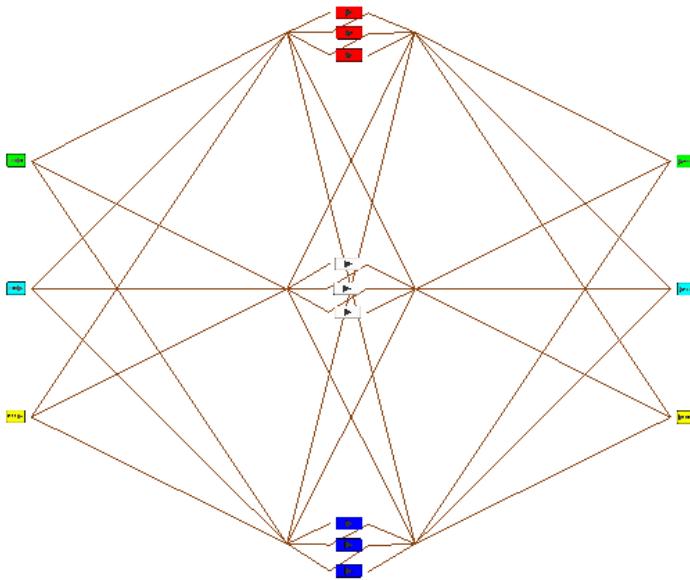
Os *sources* representam os fornecedores de matéria-prima que geram a quantidade de lotes de produtos em função da demanda prevista. Cada fornecedor possui um veículo com capacidade para transportar um lote de produtos para os fabricantes, e cada um desses fornecedores é responsável pela distribuição de um tipo específico de produto.

Já os fabricantes são capazes de processar todos os tipos de produtos, porém em tempos ciclo diferentes. Os processos são representados pelos *servers*, que possuem capacidade para processar um

produto por vez. Cada fabricante possui três *servers*, onde cada um desses *servers* representa um processo de transformação diferente. Todos os produtos antes de serem entregues aos clientes devem passar por essas três etapas de produção. O tempo de ciclo de produção varia de acordo com o produto, o processo e o fabricante. Os tempos de ciclo de cada um deles será mostrado no Quadro 5.

Após o produto atravessar os três *servers*, ele é transferido para os *sinks*, os centros de distribuição para os clientes finais. As únicas funções dos *sinks* no modelo são remover os produtos acabados do sistema e gerar dados para os relatórios.

Figura 13 – Modelagem da cadeia de suprimentos no *Simio*.



Fonte: Própria, utilizando o *software Simio Simulation* (2016).

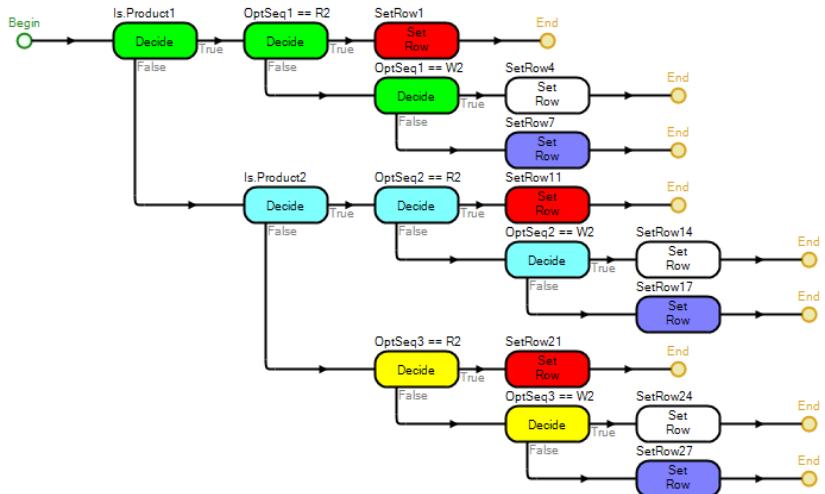
Os *servers* estão conectados a todos os *sources* e *sinks* através de um objeto chamado *path*. *Paths*, ou caminhos, são as ligações por onde as entidades viajam para chegar ao próximo objeto. Neste trabalho, esses caminhos são as estradas por onde os caminhões vão levar os produtos

para as fábricas e para os centros de distribuição. Neles são definidas as distâncias entre as instalações e as velocidades que os caminhões percorrem pela estrada.

No início de cada *path* há um objeto chamado *transfer node*, que através da lógica de decisão programada, vai definir qual será o próximo destino da entidade e qual caminho ela deve percorrer.

Uma ferramenta do *Simio* é a possibilidade de mudar a cor dos objetos. O efeito é puramente visual e não impacta nos resultados da simulação. O objetivo é melhorar a organização do modelo, tornando ele mais apresentável ou intuitivo. Como visto anteriormente na Figuras 9, 11 e 13, e a seguir na Figura 14, as cores utilizadas nesse projeto foram verde, azul claro e amarelo para os componentes relacionados aos produtos 1, 2 e 3, e vermelho, branco e azul escuro para os processos das fábricas 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 14 – Construção de processos no *Simio*.



Fonte: Própria, utilizando o *software Simio Simulation* (2016).

O que a Figura 14 acima apresenta é um exemplo de um processo¹ que é iniciado toda vez que a entidade (ou o produto, para este

¹ É importante não confundir os tipos de processos. Neste caso, o processo em questão é uma ferramenta do *Simio* que realiza uma série de ações baseado em condições e probabilidades, como um fluxograma. Já o processo do sistema

trabalho) ativa determinado evento ou atinge determinada etapa na simulação. Os processos do *Simio* neste projeto terão principalmente a função de redirecionar o produto para o destino correto baseada nas condições do sistema.

4.4.2 Dados de Produção

Após a construção do modelo (posicionamento dos objetos e os caminhos disponíveis para o fluxo de material), são adicionados os dados ao modelo. Primeiramente é adicionada a eficiência produtiva dos processos de cada produto para cada fábrica, conforme o Quadro 5.

Quadro 5 – Tempo médio de processo de um lote de produtos em horas.

		Produto 1	Produto 2	Produto 3
Fábrica 1	Processo 1	1,10	1,08	1,49
	Processo 2	0,71	0,70	0,96
	Processo 3	1,16	1,14	1,56
Fábrica 2	Processo 1	1,98	2,03	1,49
	Processo 2	0,71	0,73	0,53
	Processo 3	1,11	1,14	0,83
Fábrica 3	Processo 1	1,98	1,08	1,43
	Processo 2	1,34	0,73	0,96
	Processo 3	1,16	0,63	0,83

Fonte: Própria (2016).

Este trabalho utiliza a taxa de atendimento dos pedidos em função do *takt time* como parâmetro de comparação. Sendo *takt time* o tempo disponível de produção dividido pelo número médio de pedidos, a taxa de atendimento é a porcentagem destes pedidos que são entregues ao cliente final no prazo. Portanto os valores do Quadro 5 estão em lotes por hora.

Quanto maior o valor da tabela, maior é a quantidade de lotes que pode ser processada naquela etapa, logo algumas tendências nos valores

real, mencionado anteriormente, é uma etapa de transformação do produto semi-acabado representado no modelo pelos *servers*.

são visíveis. O Processo 1 tende a ser mais rápido enquanto o Processo 2 é o mais lento, a Fábrica 1 produz o Produto 3 com melhor eficiência enquanto a Fábrica 3 é mais eficiente na fabricação do Produto 1, entre outras.

A sequência de produção, ou a rota que a entidade percorre durante a simulação, é definida na aba de tabelas, em *Sequence Table*. O primeiro cenário segue uma sequência mais simples, onde o produto é redirecionado para uma das fábricas quando sai do fornecedor e depois realiza os Processos 1, 2 e 3 em sequência dentro da mesma fábrica até chegar ao cliente.

No segundo e mais complexo cenário, há uma quantidade muito maior de possibilidades, pois o produto pode trocar de fábrica em qualquer etapa da produção, caso seja mais eficiente. A solução sugerida neste trabalho é listar na tabela de sequência todos os possíveis destinos do produto, que são nove *servers* e três *sinks*, e após cada entidade atravessar um *server*, é iniciado um processo que irá redirecionar o produto para o destino definido pelos parâmetros de controle, alterando a ordem da *sequence table* no *Simio*.

4.4.3 Otimização com *OptQuest*

Após a construção do modelo e a adição dos dados, já é possível rodar a simulação para um cenário, mas para que realizar a otimização destes cenários, é preciso configurar a função de experimentos do *Simio*. Experimentos são séries de cenários executados em lotes pelo modelo utilizando variáveis de controle e *outputs* de resposta para comparar uma ou mais variações do sistema.

As variáveis de controle são valores associados às propriedades do sistema. Alterar os valores dessas propriedades serve como controle do que será alterado em cada cenário e neste trabalho uma das propriedades é a demanda. O sistema terá desempenhos diferentes dependendo da demanda de produtos, ou da quantidade de entidade geradas no sistema, portanto é importante configurar uma variação que permita controlar com facilidade diferentes fluxos de produtos dentro dos experimentos.

As outras variáveis de controle são responsáveis pela decisão da rota dos produtos. Esse sistema é considerado “reconfigurável” devido à possibilidade de redefinir quais fábricas realizarão cada processo apenas alterando os valores dessas variáveis. Elas também são responsáveis por gerar um código para cada configuração possível.

Como cada configuração, ou cada combinação de rotas que o produto pode tomar, possui valores diferentes para as propriedades de controle, o código da configuração é gerado a partir de uma fórmula utilizando estes valores únicos após os experimentos, assim como também é possível resgatar os valores dos parâmetros através do código usando a fórmula inversa. Os quadros abaixo são exemplos de configurações, onde o código está ligado diretamente com as células coloridas que apontam em qual fábrica deve ser realizado cada processo de cada produto, sendo vermelho para a Fábrica 1, branco para a Fábrica 2 e azul para a Fábrica 3.

Quadro 6 – Exemplo: Sequência de produção #00715.

#00715	Produto 1	Produto 2	Produto 3
Processo 1	Fábrica 2	Fábrica 3	Fábrica 1
Processo 2	Fábrica 2	Fábrica 3	Fábrica 1
Processo 3	Fábrica 2	Fábrica 3	Fábrica 1

Fonte: Própria (2016).

Quadro 7 – Exemplo: Sequência de produção #11089.

#11089	Produto 1	Produto 2	Produto 3
Processo 1	Fábrica 2	Fábrica 3	Fábrica 1
Processo 2	Fábrica 1	Fábrica 2	Fábrica 3
Processo 3	Fábrica 3	Fábrica 1	Fábrica 2

Fonte: Própria (2016).

Quadro 8 – Exemplo: Sequência de produção #18801.

#18801	Produto 1	Produto 2	Produto 3
Processo 1	Fábrica 1	Fábrica 1	Fábrica 2
Processo 2	Fábrica 1	Fábrica 2	Fábrica 3
Processo 3	Fábrica 2	Fábrica 3	Fábrica 3

Fonte: Própria (2016).

Outra função dos experimentos é simular vários cenários simultaneamente, pois como os modelos apresentam componentes estocásticos, como demanda e tempos de processo variáveis, mais replicações do cenário são necessárias para computar os intervalos de confiança.

Resumindo, na etapa de otimização é preciso definir as variáveis de controle que serão manipuladas pelo *software* para encontrar a melhor resposta (taxa de atendimento ao cliente) do sistema. Quanto maior a quantidade de replicações, melhor é a precisão dos dados obtidos. Por fim, é possível retirar um código de cada cenário a partir dos experimentos, e esse código pode ser utilizado para uma melhor análise do sistema e de opções alternativas.

4.5 MODELAGEM MATEMÁTICA

Todas as operações matemáticas apresentadas neste subcapítulo são realizadas automaticamente pelo *software* durante o processo de simulação, ou são utilizadas para a análise dos relatórios em planilhas eletrônicas.

A primeira etapa da modelagem matemática é definir o objetivo principal do modelo. Neste cenário, o objetivo principal é maximizar a taxa de atendimento ao cliente do sistema. Considerando as variáveis a seguir, o objetivo da otimização se encontra na Equação 1.

p	Processo;
P	Quantidade de processos necessário para completar a manufatura do produto;
q	Produto;
Q	Quantidade de produtos distintos;
r_{pq}	Recurso primitivo, identificação da fábrica responsável pela realização do processo p do produto q ;
R	Quantidade de fabricantes hábeis a realizar o processo p do produto q ;
n	Unidades de produto;
z	Objetivo principal, taxa de atendimento geral do sistema.

$$\max z = \frac{\sum_1^Q \text{Saída de Produto}_q}{\sum_1^Q \text{Entrada de Matéria Prima}_q} \quad (1)$$

A contagem de produtos entrando e saindo do sistema começa após um período de *warm-up*, que é um período de tempo após o início da simulação em que as estatísticas são apagadas. Em outras palavras, as estatísticas iniciais durante o período de *warm-up* são apagadas, porém a simulação continua a partir do seu estado atual. Essa ferramenta é útil para remover condições atípicas do sistema que ocorrem quando ainda não há entidades presentes.

4.5.1 Sequência de Produção

O Quadro 9 é a forma genérica da sequência de produção do sistema, similar aos exemplos dos Quadros 6, 7 e 8. No cenário teórico estudado durante este **Capítulo 4**, a matriz da sequência de produção possui **3** processos *p* representados nas linhas, **3** produtos *q* para as colunas e recursos primitivos *r* dentro de cada célula com um valor de **1** a **3** representando a fábrica que será realizado o processo.

Quadro 9 – Modelo genérico da matriz de sequência de produção.

#Sequência	Produto 1	Produto 2	Produto 3
Processo 1	r_{11}	r_{12}	r_{13}
Processo 2	r_{21}	r_{22}	r_{23}
Processo 3	r_{31}	r_{32}	r_{33}

Fonte: Própria (2016).

Porém, nem todos os cenários têm necessariamente três processos e três produtos, logo o número de planos de produção possíveis em um sistema de produção compartilhada – considerando que todos fabricantes possam realizar todos os processos – é a quantidade de fábricas elevado à soma do todos os processos do domínio de recursos, como demonstrado na Equação 2.

$$\text{Configurações Possíveis} = R^{\sum_1^Q P_q} \quad (2)$$

Substituindo os valores de *p*, *q* e *r* por **3**, conforme o modelo do Quadro 9, obtém-se um total de configurações possíveis igual a **19683**.

$$\text{Configurações Possíveis} = 3^9 = 19683 \quad (3)$$

Cada uma das configurações recebe um código único que é gerado durante o processo de simulação-otimização seguindo a Equação 4. Esse valor varia de **0** a **19682**, portanto também é possível obter o número de configurações possível através do valor máximo do código das sequências de produção.

$$\#Sequência = \sum_1^P \sum_1^Q (r_{pq} - 1) * 3^{(p-1)+3*(q-1)} \quad (4)$$

$$Configurações Possíveis = \max(\#Sequência) + 1 \quad (5)$$

A conversão da matriz da sequência para o código da sequência – bem como o processo contrário – também pode ser realizada através de um processo de mudança de base numérica², onde a base é a quantidade de fábricas e cada recurso primitivo é um algarismo da nova base. Segundo o exemplo do Quadro 9 de um sistema de três fábricas, os Quadros 10 e 11 apresentam a conversão dos valores que representam cada recurso na **base 3** para **base 10**.

Quadro 10 – Visualização dos recursos primitivos como algarismos de uma nova base numérica.

#Sequência	Produto 1	Produto 2	Produto 3
Processo 1	$(r_{11} - 1) * 3^0$	$(r_{12} - 1) * 3^3$	$(r_{13} - 1) * 3^6$
Processo 2	$(r_{21} - 1) * 3^1$	$(r_{22} - 1) * 3^4$	$(r_{23} - 1) * 3^7$
Processo 3	$(r_{31} - 1) * 3^2$	$(r_{32} - 1) * 3^5$	$(r_{33} - 1) * 3^8$

Fonte: Própria (2016).

² Os elementos do sistema são representados pelos números **1**, **2** e **3**, porém a base numérica 3 é formada pelos algarismos **0**, **1** e **2**. Logo é necessário subtrair 1 das variáveis para manter a conversão algebricamente correta.

Quadro 11 – Exemplo de conversão da base numérica 3 para base decimal.

#11089	3^0	3^1	3^2	3^3	3^4	3^5	3^6	3^7	3^8
Base 3	1	0	2	2	1	0	0	2	1
Base 10	1	0	18	54	81	0	0	4374	6561

Fonte: Própria (2016).

O processo inverso, onde o código da sequência (base 10) é convertido para a matriz da sequência (base 3), é uma série de divisões, demonstradas a seguir. Inicialmente, o código é o dividendo e a quantidade total de fábricas é o divisor da operação. O resto da divisão é a identificação da fábrica responsável pelo primeiro recurso primitivo, enquanto o quociente é utilizado na próxima divisão para descobrir o valor do segundo recurso primitivo. O processo se repete até que o último quociente atinja o valor zero.

- r_{11} : $\frac{\#Sequência_0}{3} = \#Sequência_1 + \frac{(r_{11}-1)}{3}$
- r_{21} : $\frac{\#Sequência_1}{3} = \#Sequência_2 + \frac{(r_{21}-1)}{3}$
- r_{31} : $\frac{\#Sequência_2}{3} = \#Sequência_3 + \frac{(r_{31}-1)}{3}$
- r_{12} : $\frac{\#Sequência_3}{3} = \#Sequência_4 + \frac{(r_{12}-1)}{3}$
- r_{22} : $\frac{\#Sequência_4}{3} = \#Sequência_5 + \frac{(r_{22}-1)}{3}$
- r_{32} : $\frac{\#Sequência_5}{3} = \#Sequência_6 + \frac{(r_{32}-1)}{3}$
- r_{13} : $\frac{\#Sequência_6}{3} = \#Sequência_7 + \frac{(r_{13}-1)}{3}$
- r_{23} : $\frac{\#Sequência_7}{3} = (r_{33} - 1) + \frac{(r_{23}-1)}{3}$
- r_{33} : Quociente da última divisão

4.5.2 Demanda e Restrições

O modelo utiliza o *takt time* dos produtos a fim de definir o ritmo em que as entidades (lotes de produtos) são geradas no sistema. Apesar de que “demanda” é um parâmetro mais comum na bibliografia, os dois

termos estão diretamente conectados por uma simples igualdade. O *takt time* é o tempo médio que determinada quantidade de produtos entra no sistema, enquanto a demanda é a quantidade média de produtos que entra no sistema dentro de determinado período.

$$\text{Takt time} = \text{Demanda}^{-1} \quad (6)$$

Logo, para que o sistema consiga atender a 100% da demanda, o *takt time* de um produto q deve ser maior que o tempo de ciclo de todos os processos p do produto q .

$$\text{Takt time}_q \geq \text{Tempo de Ciclo}_{pq} \quad (7)$$

A partir da ideia de que o *takt time* da Equação 7 está em função da quantidade de lotes de produtos que entra no sistema, podemos definir a Equação 8. Para que 100% da demanda possa ser atendida, a soma das capacidades que todas as fábricas têm de realizar os processos p deve ser maior que o total de produtos q que realizarão os processos p vezes seu tempo de ciclo.

$$\sum_1^R \text{Capacidade}_{rp} \geq \sum_1^Q n_q \times \text{Tempo de Ciclo}_{pq} \quad (8)$$

Devido à natureza estocástica da simulação, é muito difícil modelar matematicamente a capacidade de transporte em função da quantidade de produtos ou da sequência de produção. Portanto é necessário definir novas variáveis para a restrição.

D	Percorso;
d	Distância do percurso D ;
v	Veículo;
s_v	Velocidade do veículo v ;
m_{vd}	Total de vezes que o veículo v realizou o percurso d .

$$\text{Capacidade}_v \geq 2 \times \sum_1^D \frac{m_{vd} \times d}{\overline{s_v}} \quad (9)$$

Para que todas os lotes de produtos sejam transportados sem atraso, a capacidade de transporte do veículo v deve ser maior que duas vezes a distância total percorrida (número de viagens vezes a distância das viagens) sobre a velocidade média do veículo v .

5 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS COLABORATIVOS

A fim de testar a aplicabilidade do procedimento desenvolvido no **Capítulo 4**, serão propostos alguns cenários para avaliação. Primeiro são realizadas simulações do cenário teórico apresentado a fim de estudar problemas de capacidade produtiva, capacidade de transporte e propor melhorias com base nos resultados obtidos nos relatórios de simulação. Depois alguns cenários serão gerados aleatoriamente e as principais conclusões obtidas serão listadas.

Em seguida será realizada uma revisão de um caso estudado no artigo “Proposta de método de otimização-simulação para apoiar a tomada de decisão em internalização de processos produtivos” (SILVA *et al.*; 2015). Enquanto esse artigo realizou a otimização através de planilhas eletrônicas, este trabalho realiza a otimização utilizando os mesmos dados, porém através da ideia de reconfiguração de recursos primitivos para fábricas virtuais.

5.1 SIMULAÇÃO DE UM CENÁRIO TEÓRICO

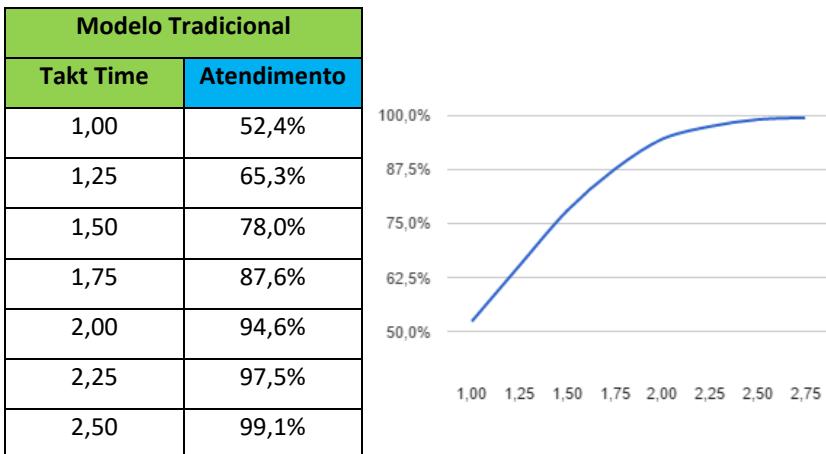
Este capítulo põe em prática o procedimento do caso teórico discutido no **Capítulo 4**. Utilizando os modelos, as fórmulas e os dados vistos anteriormente, será identificada a melhor sequência de produção através do procedimento de otimização baseado em simulação, considerando as restrições de capacidade produtiva e transporte.

5.1.1 O problema da capacidade de produção

O Quadro 5 visto anteriormente apresenta os tempos dos processos dos lotes de produtos nas fábricas em horas, enquanto a primeira coluna da Figura 15 a seguir mostra a demanda média (*takt time*) em horas por lote. Esses dados são usados como *input* no modelo de simulação que, a partir de 1.000 iterações por cenário, obteve como resultado a taxa de atendimento para os níveis de demanda simulados.

Como demonstrado na segunda coluna da Figura 15, para o modelo competitivo tradicional, mais de 99% dos pedidos daquele período são atendidos caso o *takt time* de cada produto seja de 2,5 horas por lote. O período usado na simulação foi de cinco dias, além de mais um dia extra de *warm-up*.

Figura 15 – Taxa de atendimento ao cliente em função do *takt time* no modelo tradicional.



Fonte: Própria (2016).

Já para o sistema OPIM, uma otimização foi realizada através do *OptQuest*, um *add-in* do Simio que manipula parâmetros de controle vinculados à sequência de produção para identificar a melhor alternativa dentre os milhares de diferentes cenários gerados.

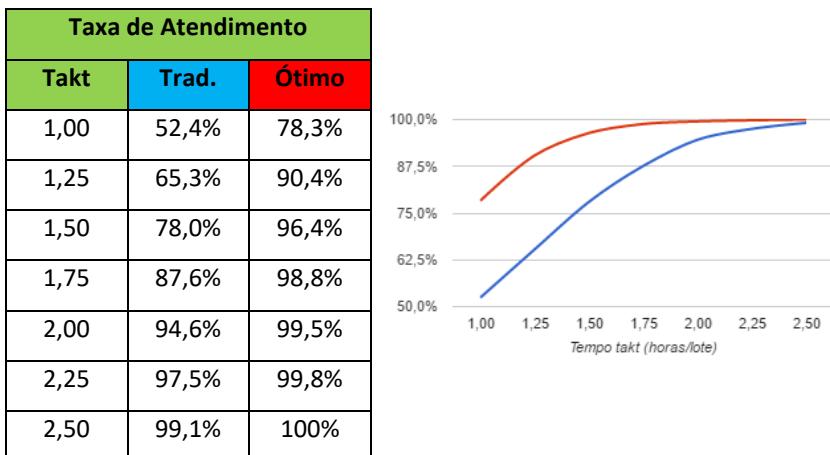
Esse processo de otimização baseado em simulação identificou que a sequência com o código #12285 possui a melhor taxa de atendimento ao cliente para cenários em que os três produtos possuem o mesmo *takt time*. A sequência #12285 pode ser vista a seguir no Quadro 12, enquanto a Figura 16 mostra a comparação do sistema tradicional de três competidores com uma empresa virtual de três parceiros seguindo o plano de produção #12285.

Quadro 12 – Sequência de produção #12285.

#12285	Produto 1	Produto 2	Produto 3
Processo 1	Fábrica 1	Fábrica 3	Fábrica 2
Processo 2	Fábrica 1	Fábrica 2	Fábrica 3
Processo 3	Fábrica 1	Fábrica 3	Fábrica 2

Fonte: Própria (2016).

Figura 16 – Comparação das taxas de atendimento dos modelos tradicional e otimizado.



Fonte: Própria (2016).

Como a Fábrica 1 possui menores tempos de produção para o Produto 1 em relação às outras duas fábricas, a otimização buscou por sequências que dedicassem a capacidade da Fábrica 1 na produção do Produto 1. Para os outros dois produtos, nenhuma das fábricas possuem uma eficiência de produção consistente em todos os três processos, logo torna-se mais vantajoso transportar o produto semiacabado para a fábrica que realize o próximo processo mais eficientemente.

Em um sistema OPIM, cada etapa da produção (ou recurso primitivo) pode ser estudada como um subsistema independente dos outros recursos. O Quadro 13 a seguir apresenta os tempos médios em horas que os produtos semiacabados esperaram no *buffer* da máquina antes de ser processado, retirados do relatório de simulação. Esses tempos de espera são consequência de longos tempos de processo, vistos anteriormente no Quadro 5, pois processos mais demorados tendem a gerar gargalos nos estoques pré-processo.

Quadro 13 – Tempo médio de espera dos produtos no *buffer* (em horas).

		Tradisional	Ótimo
Fábrica 1	Processo 1	3,09	5,33
	Processo 2	1,12	2,56
	Processo 3	2,74	4,17
Fábrica 2	Processo 1	8,10	7,30
	Processo 2	0,52	0,36
	Processo 3	1,07	0,98
Fábrica 3	Processo 1	5,05	4,60
	Processo 2	1,75	0,47
	Processo 3	0,84	0,73

Fonte: Própria (2016).

Nota-se que o *buffer* do Processo 1 da Fábrica 2 é onde os produtos mais esperam até serem processados, por possuir maiores tempos de processo (ou em outras palavras, menor capacidade produtiva).

Aproveitando a facilidade do *software* de simulação em testar diferentes cenários, foi feito um novo teste com uma alteração no modelo para reduzir o tempo de espera antes do Processo 1 da Fábrica 2. Neste teste, cujo o resultado médio de 1.000 iterações está no Quadro 14, duas entidades podem realizar o Processo 1 da Fábrica 2 ao mesmo tempo, como se uma segunda máquina fosse adquirida, efetivamente dobrando a capacidade produtiva.

Comparando os resultados antigos no Quadro 13 com os resultados da melhoria da capacidade no Quadro 14, houve uma redução de aproximadamente 80% do tempo médio de espera no *buffer* do primeiro processo da Fábrica 2 tanto no cenário tradicional, quanto no cenário otimizado. A grande diferença é que no cenário tradicional, todos os outros oito processos tiveram um aumento no tempo de espera no *buffer*, enquanto no cenário do sistema OPIM o tempo de espera antes do Processo 1 da Fábrica 2 teve uma significante redução sem alterar o tamanho dos *buffers* dos outros processos.

Quadro 14 – Tempo médio de espera após aumento da capacidade do Processo 1 da Fábrica 2.

		Tradicional	Ótimo
Fábrica 1	Processo 1	4,11	5,33
	Processo 2	1,61	2,48
	Processo 3	3,47	4,13
Fábrica 2	Processo 1	1,67	1,34
	Processo 2	1,27	0,42
	Processo 3	2,06	2,13
Fábrica 3	Processo 1	6,88	4,63
	Processo 2	2,28	0,95
	Processo 3	0,98	0,81

Fonte: Própria (2016).

Isso é um reflexo da independência das máquinas dedicadas. Quando um gargalo é eliminado em um sistema de produção tradicional, apesar de uma melhoria em geral na capacidade de atendimento da demanda, há um aumento no fluxo de produtos dentro da fábrica e consequentemente um maior esforço dos outros processos para suportar esse fluxo.

Um fenômeno parecido observado neste teste é o aumento da taxa de atendimento ao cliente por tipo de produto, cujo os dados estão no Quadro 15 a seguir. Em ambos os cenário, a soma da taxa média de atendimento dos três produtos é aproximadamente 30%, porém no sistema tradicional esse aumento foi dividido entre os três produtos, pois como todas as fábricas são responsáveis pela produção todos os produtos. Aumentar a capacidade de apenas um processo afeta todos os outros.

O contrário é observado no sistema OPIM, pois como o Processo 1 da Fábrica 2 foi dedicado para a produção do Produto 3, os 30% de aumento na taxa de atendimento ficaram concentrados no Produto 3.

Quadro 15 – Taxa de atendimento da demanda por tipo de produto.

	Capacidade Original	
	Tradicional	Ótimo
Produto 1	52,3%	79,2%
Produto 2	51,7%	89,1%
Produto 3	52,0%	67,4%

	Capacidade Aprimorada	
	Tradicional	Ótimo
Produto 1	62,4%	79,7%
Produto 2	62,7%	87,2%
Produto 3	62,2%	98,1%

Fonte: Própria (2016).

5.1.2 O problema da capacidade de transporte

A partir das informações do subcapítulo anterior sobre os problemas da capacidade produtiva, podemos tomar algumas conclusões sobre a capacidade de transporte dos produtos entre as plantas e o balanceamento de todas as operações da cadeia.

Em alguns cenários, é melhor enviar os produtos semiacabados para serem processados em outra fábrica devido a ociosidade dos veículos e da sobrecarga dos processos. Uma melhor utilização da capacidade disponível dos veículos alivia a capacidade produtiva da fábrica, balanceando o sistema como um todo.

Durante os processos de simulação anteriores, foi utilizada uma distância de dez quilômetro entre os fornecedores e as fábricas e entre as fábricas e os centros de distribuição para os clientes. Já as três fábricas estavam a uma distância de cinco quilômetro uma das outras, enquanto os seis veículos dedicados (um para cada fornecedor e um para cada fabricante) viajavam há uma velocidade média de sessenta quilômetro por hora. De acordo com a definição original de Michael Porter (1990), todos os parceiros da cadeia estão relativamente próximos o suficiente um dos outros para que esse grupo possa ser definido como um *cluster*.

A fim de expandir a análise da proximidade geográfica dos membros da cadeia, foi realizada uma série de simulações comparando a sequência #12285, obtida anteriormente, com a sequência #10179, apresentada no Quadro 16, que segue a mesma lógica de dedicar recursos primitivos para a manufatura dos produtos que tenha a maior eficiência, porém evitando ao máximo o transporte de produtos semiacabados entre os fabricantes.

Quadro 16 – Sequência de produção #10179.

#10179	Produto 1	Produto 2	Produto 3
Processo 1	Fábrica 1	Fábrica 3	Fábrica 2
Processo 2	Fábrica 1	Fábrica 3	Fábrica 2
Processo 3	Fábrica 1	Fábrica 3	Fábrica 2

Fonte: Própria (2016).

Nessa análise foi simulado um período de transporte maior que anterior, cujo os resultados se encontram no **Apêndice A**. Os resultados estão em função de quatro parâmetros:

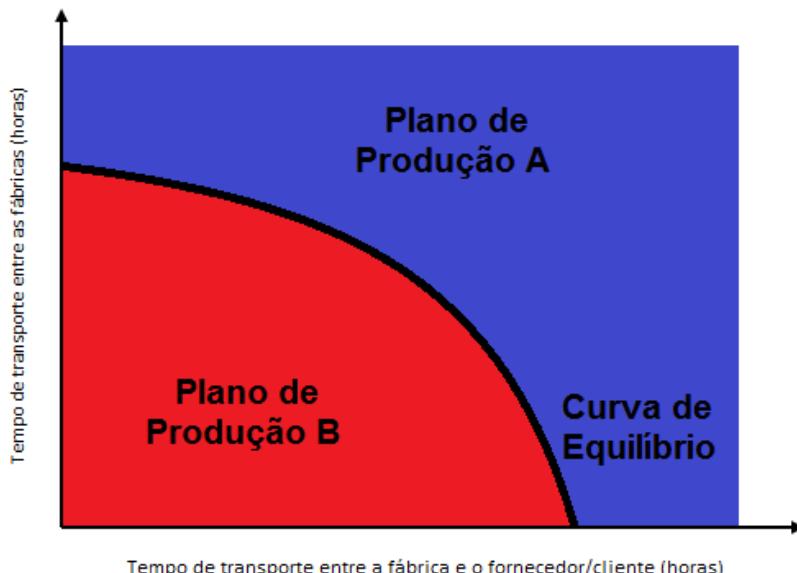
1. Tempo de transporte das fábricas para os fornecedores e centros de distribuição, que variam de 0,2 a 2,0 horas em trânsito.
2. Tempo de transporte entre fabricantes, que também variam de 0,2 até 2,0 horas.
3. Demanda de produtos, que possuem um *takt time* variando de 1,0 até 2,5 horas por lote para cada produto.
4. Plano de produção OPIM, onde o **Produto 2** e o **Produto 3** trocam de fabricante durante a sequência #12285, porém se mantêm na mesma fábrica durante a sequência #10179.

De acordo com os resultados do **Apêndice A**, pode-se concluir que por mais ineficiente que seja um processo, o *software* de simulação sugere que a manufatura seja realizada toda na mesma fábrica, caso não haja veículos suficientes para realizar o transporte ou suas capacidades de transporte estejam sobrecarregadas.

Com isso em vista, é possível explorar as funcionalidades deste procedimento de otimização baseada em simulação para definir qual é a distância máxima entre as fábricas para compensar o transporte do produto semiacabado. Para isso é necessário estudar os relatórios de simulação para identificar uma curva de equilíbrio, conforme

exemplificado na Figura 17, onde um plano de produção pode ser melhor que o outro dependendo da posição em relação à curva.

Figura 17 - Comparação de dois planos de produção em função dos tempos de transporte.



Fonte: Própria (2016).

Um dos mais importantes indicadores de desempenho de transporte é a taxa de utilização dos veículos. Os Quadros 17 e 18 a seguir podem ser utilizados para comparar o sistema OPIM com o tradicional e para estudar o impacto da proximidade geográfica no modelo. Foi utilizada uma escala de vermelho para representar o nível de utilização dos seis veículos do sistema a um *takt time* de 1,5 horas por lote de produtos.

Quadro 17 – Taxa de utilização dos veículos em um sistema OPIM.

Distância (horas)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Fornecedor 1	24,4%	42,6%	73,4%	94,4%	98,1%	99,0%	99,3%	99,5%	99,6%	99,7%
Fornecedor 2	37,9%	50,4%	72,3%	93,9%	98,7%	99,7%	99,8%	99,9%	99,9%	100,0%
Fornecedor 3	16,8%	41,6%	63,9%	93,4%	97,3%	98,3%	99,3%	99,2%	99,5%	99,7%
Fábrica 1	14,0%	32,2%	57,0%	79,4%	84,3%	86,6%	87,0%	86,5%	85,7%	85,5%
Fábrica 2	15,0%	34,2%	65,1%	81,6%	87,0%	86,7%	87,5%	85,9%	86,1%	85,3%
Fábrica 3	15,5%	38,6%	59,4%	82,7%	85,6%	87,1%	86,1%	86,5%	84,7%	84,8%

Fonte: Própria (2016).

Quadro 18 – Taxa de utilização dos veículos em um sistema tradicional.

Distância (horas)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Fornecedor 1	52,1%	66,4%	86,9%	94,7%	97,7%	98,7%	99,3%	99,5%	99,1%	99,6%
Fornecedor 2	55,4%	64,2%	85,3%	93,2%	98,4%	98,8%	99,6%	98,9%	99,2%	99,8%
Fornecedor 3	55,8%	68,2%	85,8%	93,8%	97,1%	97,9%	98,8%	99,4%	99,6%	99,4%
Fábrica 1	13,0%	31,2%	50,7%	69,6%	77,2%	75,9%	78,8%	76,2%	77,9%	73,0%
Fábrica 2	13,4%	31,6%	49,5%	70,7%	79,8%	79,2%	80,9%	74,8%	78,4%	79,0%
Fábrica 3	13,5%	34,8%	58,6%	75,3%	80,2%	83,6%	81,6%	85,3%	80,5%	83,1%

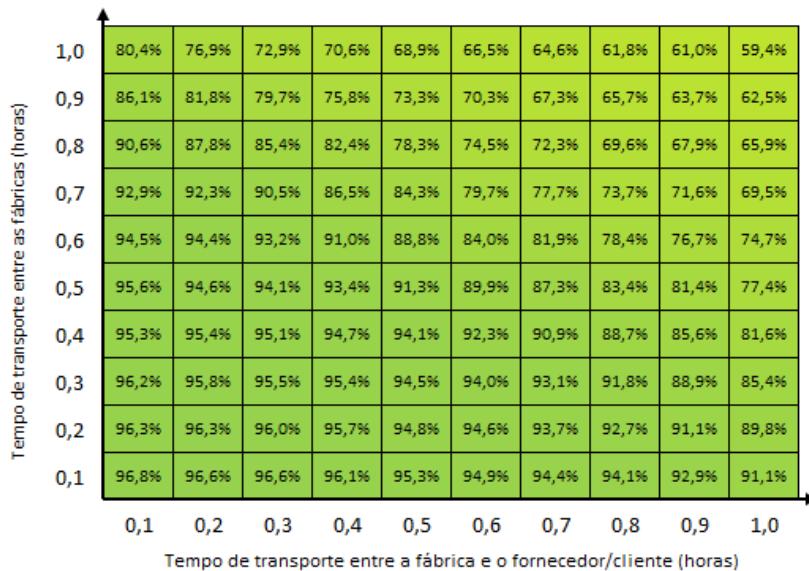
Fonte: Própria (2016).

É perceptível que conforme o tempo de viagem entre os fornecedores e os clientes se aproxima de uma hora, a capacidade dos veículos dos fornecedores chega ao limite, consequentemente limitando a utilização dos veículos dos fabricantes.

A taxa de utilização dos veículos dos fabricantes tende a ser maior em sistemas OPIM, mesmo limitado pelos fabricantes, pois uma melhor eficiência produtiva exige um melhor desempenho de transporte. Quanto mais rápido a fábrica terminar a produção, menos tempo os veículos precisam esperar por um lote de produtos acabados.

Depois das primeiras análises dos dados, foi proposto um aumento na capacidade dos veículos com o objetivo de identificar o comportamento de sistemas com transporte mais eficiente. As Figuras 18 e 19 apresentam a taxa de atendimento ao cliente em um modelo que os veículos possuem o dobro da capacidade dos modelos do **Apêndice A**. O *takt time* utilizado nesse modelo foi 2,5 horas por lote.

Figura 18 – Taxa de atendimento ao cliente da sequência #12285 com capacidade dos veículos ampliada.



Fonte: Própria (2016).

Figura 19 – Taxa de atendimento ao cliente da sequência #10179 com capacidade dos veículos ampliada.



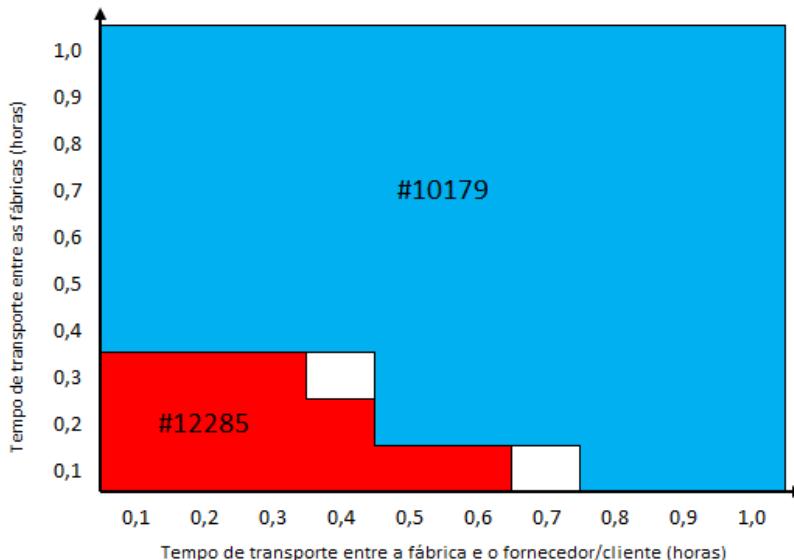
Fonte: Própria (2016).

Analizando os valores percentuais dos gráficos, nota-se que até determinado ponto a taxa de atendimento não possui diferenças significativas. A capacidade dos veículos tem um impacto maior em cenários em que a distância entre as fábricas também é maior.

Isso significa que, conforme já previsto, dentro de uma certa margem, a cadeia de produção estará limitada pela capacidade de produção e o *software* de simulação irá sugerir uma sequência de produção que priorize processos eficientes. Fora dessa margem, onde as distâncias entre as instalações são maiores, o *software* irá sugerir uma sequência que evite o transporte entre fabricantes.

A Figura 20 a seguir é uma sobreposição das Figuras 18 e 19 que evidencia qual é a melhor opção em função dos tempos de transporte, formando a curva de equilíbrio.

Figura 20 – Curva de comparação entre as sequências #12285 e #10179 com a capacidade dos veículos ampliada.



Fonte: Própria (2016).

5.2 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS GERADOS ALEATORIAMENTE

A partir dos princípios desenvolvidos no **Capítulo 4**, foram feitos testes com modelo gerados aleatoriamente. Isso significa que foram obtidos dados aleatórios de demanda, tempos de ciclo de produção, posições geográficas das fábricas, fornecedores e clientes e usados para alimentar os modelos computacionais para testes de simulação.

Uma nova restrição desses cenários aleatórios é que as fábricas não possuem maquinário/mão-de-obra necessário para determinados processos. Quais processos que cada fábrica tem a possibilidade de produzir também são definidos aleatoriamente, sendo no máximo cinco processos para as cinco fábricas da região.

Uma das vantagens desse tipo de análise, é que dados aleatórios permitem estudar a aplicação do método em cenários incomuns, onde os dados podem estar nos extremos de uma distribuição, bem como podem estar muito próximos uns dos outros.

5.2.1 Resultados dos cenários aleatórios

Os dados dos cenários gerados aleatoriamente e seus resultados estão disponíveis no **Apêndice B**. O processo de otimização baseado em simulação foi aplicado em quatro cenários aleatórios com o objetivo de maximizar a taxa de atendimento ao cliente. Após a comparação dos resultados com os dados de *input*, obteve-se as seguintes conclusões:

- Em vários casos, a otimização sugere que o produto passe por um processo menos eficiente a fim de aproveitar uma rota de transporte mais rápida. Isso é visível em vários casos, onde fábricas mais eficientes são evitadas por estarem muito longe do fornecedor e do cliente.
- Em alguns casos, a otimização sugere que a um primeiro momento, o produto tome caminhos subótimos prevendo uma melhor rota para os próximos processos. No **Cenário #04**, a **Fábrica 5** está a uma distância da **Fábrica 1** muito parecida com a distância da **Fábrica 2**. Porém os primeiros processos são realizados na **Fábrica 1**, que é inicialmente mais ineficiente, porque a **Fábrica 2** é mais ineficiente nos processos seguintes.
- Processos ineficientes criam gargalos que diminuem a necessidade de que os próximos processos ou os processos anteriores sejam eficientes. Por exemplo, no **Cenário #01** o produto passa obrigatoriamente pela ineficiente **Fábrica 5** durante o **Processo 2**, freando todos os processos do sistema. Os melhores resultados têm os processos realizados nas fábricas mais ineficientes, porém mais próximas do fornecedor e do cliente, pois devido ao gargalo do **Processo 2**, todos os outros processos ficaram ociosos.
- Segundo uma lógica contrária, o *takt time* do produto tem pouca ou nenhuma interferência nas melhores sequências de produção. As taxas de atendimento de todas as sequências variam simultaneamente com a demanda, sem alterar a ordem entre elas.
- O *software* irá sugerir o processo mais eficiente caso o sistema esteja suficientemente balanceado, sem gargalos e com capacidade disponível nos veículos. Um exemplo foi o **Cenário #03**, onde todas as fábricas são candidatas a realizar algum dos

processos, devido a um equilíbrio entre os tempos de processo e transporte.

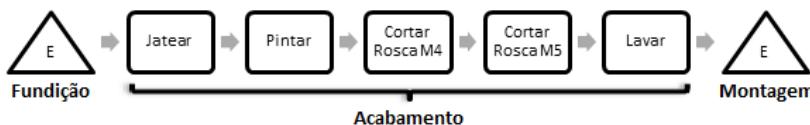
Nenhuma dessas conclusões é uma regra aplicável em todos os casos. As melhores sequências de produção dependem de uma combinação desses pontos levantados. Prever a melhor sequência pode ser algo difícil de prever intuitivamente sem uma confiável visão sistêmica, o que enfatiza análise sistêmica como uma das vantagens da simulação como apoio à decisão.

5.3 REVISÃO DE UM PROCESSO DE ACABAMENTO REAL

A empresa estudada neste caso terceirizava as operações de acabamento de uma linha de condutores de alumínio sem rosca (tipo CSR) com bitolas de $1\frac{1}{4}$ " (CSR-25), $1\frac{1}{2}$ " (CSR-30), 2" (CSR-35) e $2\frac{1}{2}$ " (CSR-40); porém, por possuir índices de eficiência superiores ao fornecedor, notou-se que o custo de produção interna era menor que o oferecido pelo fornecedor, por esse motivo foi resolvido que seria utilizado o máximo possível de sua capacidade ociosa na produção de peças anteriormente terceirizadas.

Os processos de acabamento internalizados estão representados na Figura 21. O setor de planejamento e controle da produção (PCP) envia uma ordem de produção, assim que as peças saem da fundição, conforme o plano de produção. Em lotes, as peças passam por um rotojato de granulhas de aço para melhorar a adesão da tinta em pó durante o processo seguinte de pintura. Em seguida, são levadas para uma célula de corte das roscas para parafusos M4 e M5 e, por fim, as peças são lavadas antes de serem enviadas para a montagem.

Figura 21 – Fluxo de produção dos condutores.



Fonte: Silva, Frazzon & Casarotto Filho (p. 156, 2015)

Um novo fator que será levado em consideração no modelo revisado é a distância entre as duas fábricas. A fábrica principal está localizada no distrito industrial de Joinville-SC, enquanto a segunda

fábrica que disponibilizará a capacidade, caso seja necessário, está localizada em Garuva-SC.

Buscando pelos endereços através do *website* Google Maps, foi identificado que a distância entre as duas fábricas é de 29,9 quilômetros, ou 26 minutos em trânsito normal. Já os custos dos processos de acabamento estão no Quadro 19 a seguir.

Quadro 19 – Custos dos processos de acabamento em reais por unidade.

	CSR-25	CSR-30	CSR-35	CSR-40
Custo Interno	4,79	5,20	6,01	14,37
Custo Externo	5,71	6,09	7,54	16,30

Fonte: Adaptado de Silva, Frazzon & Casarotto Filho (p. 160, 2015).

O sistema é modelado de forma idêntica ao modelo original utilizando os dados de produção dos Quadros 20 e 21, retirados do sistema gerencial da empresa. O processo de pintura possui uma probabilidade de falha de 2%, necessitando que o produto seja retrabalhado em seguida.

Quadro 20 – Dados de produção dos processos de acabamento.

	CSR-25	CSR-30	CSR-35	CSR-40
Demandas/mês	3122	5754	7586	378
Jatear	3,8	5,8	8,2	15,0
Pintar	1,5	1,5	1,5	2,4
Cortar M4	5,5	5,5	5,5	5,5
Cortar M5	5,0	5,0	5,0	5,0
Lavar	2,9	4,0	5,6	6,4

Fonte: Silva, Frazzon & Casarotto Filho (p. 165, 2015).

Quadro 21 – Plano de produção semanal.

	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta
08:00	Jatear	Jatear	Pintar	M4/M5	Lavar
09:00	Jatear	Jatear	Pintar	M4/M5	Lavar
10:00	Jatear	Jatear	Pintar	M4/M5	Lavar
11:00	Jatear	Jatear	Pintar	M4/M5	Lavar
Almoço					
14:00	Jatear	Jatear	M4/M5	M4/M5	Lavar
15:00	Jatear	Jatear	M4/M5	M4/M5	Lavar
16:00	Jatear	Jatear	M4/M5	M4/M5	Lavar
17:00	Jatear	Jatear	M4/M5	M4/M5	Lavar

Fonte: Silva, Frazzon & Casarotto Filho (p. 165, 2015).

A função objetivo do cenário busca a minimização da soma entre os custos internos e externos dos processos, conforme a Equação 10 abaixo, enquanto as restrições do sistema incluem as capacidades de produção, de acordo com o plano de produção gerado pelo PCP, e a necessidade de atender a 100% da demanda do processo de montagem.

$$\min z = \sum_1^I n_i \times \alpha_i + \sum_1^I m_i \times \beta_i \quad (10)$$

- z Função objetivo, soma dos custos internos e externos;
- i Identificação dos produtos CSR-25, CSR-30, CSR-35 e CSR-40;
- I Total de produtos diferentes;
- n_i Quantidade de produtos i produzidos internamente;
- m_i Quantidade de produtos i terceirizados;
- α_i Custo para realizar os processos do produto i internamente;
- β_i Custo dos processos terceirizados do produto i .

As restrições de capacidade e taxa de atendimento foram explicadas no **Subcapítulo 4.4**.

5.3.1 Resultados para o estudo do caso real

O resultado final do processo de otimização está disponível no **Apêndice C** e resumido nos quadros a seguir. Através da Equação 2, foi identificado que o total de configurações possíveis para esse modelo é 16. Logo foi realizada a simulação de todas essas configurações e os resultados foram ordenados de acordo com o custo total de produção, conforme a Equação 10.

Os seis menores resultados não atendem a 100% da demanda, portanto o custo real será maior que o obtido depois de considerar os custos de atraso de entrega. A primeira configuração que atende completamente a demanda é a **Sequência #13**, que sugere que os produtos CSR-25 e CSR-30 sejam produzidos na fábrica em Garuva, enquanto os produtos CSR-35 e CSR-40 sejam produzidos em Joinville.

A decisão de qual produto permanecerá em Joinville é justificado no Quadro 22. O produto CSR-35 é o que tem o maior aumento de custo quando é produzido em Garuva, então a programação sugere que sejam transportados produtos com uma menor diferença de custo entre as duas fábricas.

Porém a restrição de capacidade produtiva impede que os produtos CSR-25 ou CSR-30 sejam produzidos juntos com o CSR-35 em Joinville. Não há capacidade suficiente para uma quantidade tão alta de unidades, então o produto CSR-40 é o escolhido para ser produzido junto com o CSR-25 por ser o único que exige uma capacidade menor que a restante disponível.

Quadro 22 – Diferença dos custos internos e externos de fabricação.

	CSR-25	CSR-30	CSR-35	CSR-40
Joinville	4,79	5,20	6,01	14,37
Garuva	5,71	6,09	7,54	16,30
Diferença	+19%	+17%	+25%	+13%

Fonte: Própria (2016).

Os Quadros 23 e 24 apresentam uma comparação entre o resultado do processo de otimização do artigo original e o resultado do novo método baseado na criação de fábricas virtuais. Enquanto o Quadro 23 mostra a quantidade de produtos designada para cada fábrica, o Quadro 24 mostra o custo total de produção das duas fábricas.

Quadro 23 – Quantidade de unidades produzidas internamente e terceirizadas.

		CSR-25	CSR-30	CSR-35	CSR-40
Original	Joinville	3100	0	2000	350
	Garuva	22	5754	5586	28
	TOTAL	3122	5754	7586	378
Revisado	Joinville	0	0	7586	378
	Garuva	3122	5754	0	0
	TOTAL	3122	5754	7586	378

Fonte: Própria (2016).

Quadro 24 – Resultado da simulação dos modelos original e revisado.

		CSR-25	CSR-30	CSR-35	CSR-40	TOTAL
Original	Joinville	14.849,00	-	12.020,00	5.029,50	31.898,50
	Garuva	125,62	35.041,86	42.118,44	456,40	77.742,32
	TOTAL	14.974,62	35.041,86	54.138,44	5.485,90	109.640,82
Revisado	Joinville	-	-	45.591,86	5.431,86	51.023,72
	Garuva	17.826,62	35.041,86	-	-	52.868,48
	TOTAL	17.826,62	35.041,86	45.591,86	5.431,86	103.892,20

Fonte: Própria (2016).

Nota-se nesses últimos quadros que o custo total dos processos de acabamento utilizando o novo método foi 5,24% menor que o método original. Isso se deve à natureza dos *softwares* usados no processo de otimização.

O artigo original utilizou o Solver, um *add-in* do Microsoft Excel, para resolver a programação linear. Foi escolhida aleatoriamente uma das variáveis de controle e feita a otimização a partir dela. É possível que o resultado seja melhor caso a otimização se inicie com outra variável, mas o Solver geralmente descarta opções que inicialmente tenham um pior resultado, mesmo que o resultado seja melhor no longo prazo.

Como o novo método baseado no *Simio* testou todas as configurações de fábricas virtuais possíveis, foi possível ordena-las em função do custo total e filtra-las caso a demanda não tivesse sido atendida.

Outro ponto observado é uma característica dos sistemas OPIM em relação a sistemas tradicionais, onde o processo está associado exclusivamente a um recurso primitivo. No sistema original, uma parte dos lotes de CSR-35 foi terceirizada, enquanto a outra parte foi internalizada. Após revisado, os produtos tiveram sua produção 100% terceirizada ou 100% internalizada, não houve uma tentativa de equilíbrio.

6 CONCLUSÕES

A principal função da simulação de processos é adquirir conhecimento sem a necessidade de análises empíricas e é uma solução alternativa a ferramentas mais caras e/ou menos precisas. Isso viabiliza o estudo de conceitos de alta complexidade de aplicação em sistemas reais, como as empresas virtuais que, por demandar um alto nível de cooperação e outros requisitos de várias empresas distintas, não é sempre possível desenvolver um sistema real para pesquisas acadêmicas.

Para uma simulação eficaz é necessária uma grande base de conhecimento que é adquirida através de estudos de casos, publicações teóricas e analíticas sobre o tema que se deseja estudar. Esse conhecimento permite identificar as lacunas na teoria, que serão o objeto de estudo das pesquisas com simulação, assim como servirá de *input* durante o processo de modelagem computacional do sistema. Quanto mais rica e precisa for a informação, maior é a proximidade do comportamento do sistema modelado com o sistema real.

Recentemente houve poucas publicações originais sobre o conceito de *One Product Integrated Manufacturing*, provavelmente devido à dificuldade de implementação do sistema, causada por um alto nível de confiança necessário entre os membros envolvidos na cadeia.

Porém, conforme os anos forem passando, a capacidade dos computadores de transmissão, armazenamento e processamento de dados aumentará significativamente, facilitando a implantação de sistemas que requerem análises em extensas bases de dados em tempo real. Informações e documentos sendo transferidos em frações de segundo eliminarão a fronteira virtual entre empresas distintas.

Entre os recursos primitivos da rede, podem-se adicionar outras organizações além das empresas de transformação de material, como instituições financeiras, de educação ou de apoio ao desenvolvimento local. A partir de um processo de otimização, é possível identificar quais instituições resultarão em uma maior eficiência global do sistema em função de parâmetros como posição geográfica, eficiência individual, nível de cooperação e distância dos parceiros.

Para explorar a potencial flexibilidade das colaborações, a cadeia de suprimentos deve ser projetada para permitir a adaptação de rotas e cronogramas. Para uma alta agilidade, os níveis de estoque e o *lead time* dentro da cadeia de valor devem ser reduzidos. Para garantir que as necessidades do consumidor ainda possam ser satisfeitas com segurança, é preciso um alto nível de sincronização entre as organizações, portanto

o compartilhamento de informação é indispensável (BRETTTEL et al.; p. 39, 2014).

Quando se compara os resultados do sistema OPIM com o tradicional, nota-se que a melhoria na taxa de atendimento é mais significante em cenários com maior dificuldade de entrega, ou maior demanda. Porém uma maior garantia de que os pedidos serão entregues não representa necessariamente menores custos de produção. Não houve uma sólida redução de estoques e houve um aumento na utilização dos veículos de transporte, reduzindo sua disponibilidade.

A simulação computacional facilitou a identificação de um problema do sistema e permitiu testar uma possível correção imediatamente. Os resultados da simulação do modelo corrigido mostraram valores que não poderiam ser previstos com a mesma facilidade com outras ferramentas de melhoria. Porém para identificar a melhor solução de um problema, é necessário definir quais indicadores se busca otimizar.

Para atingir um controle de produção mais realístico possível, são necessárias informações constantemente atualizadas da situação dos recursos da fábrica, e os indicadores de desempenho têm a função de identificar o impacto das ações aplicadas ao sistema. Os indicadores revelam as falhas de planejamento e a execução e oferecem oportunidades de identificar e corrigir problemas em potencial. Uma empresa tradicional já possui certos indicadores, como por exemplo, o retorno de investimento para medir o desempenho financeiro, porém um sistema de cooperação exige novas formas de mensuração que as empresas têm dificuldade de encontrar.

6.1 LIMITAÇÕES DO PROJETO

Durante o desenvolvimento do trabalho, surgiram algumas dificuldades que limitaram uma melhor exploração do tema proposto. O primeiro deve-se à escala do objeto de estudo. Não foi encontrada uma rede de empresas com uma estrutura similar a do modelo proposto que disponibilizasse informações de produção para uma análise. No cenário competitivo que a região se encontra, algumas empresas se tornaram muito protetoras dos dados internos. Esse protecionismo impede que as empresas criem as parcerias necessárias para a realização do estudo deste trabalho.

Algumas ideias aplicadas no trabalho para contornar esse problema foram: (1) realizar as pesquisas inicialmente em uma escala menor e utilizar as conclusões iniciais em analogias com redes de

empresas completas; (2) realizar as pesquisas em ambientes teóricos, buscando simular com fidelidade as características do objeto de estudo; e (3) preparar o conteúdo e criar uma base para pesquisas futuras.

Também foram encontradas dificuldades durante a fundamentação teórica. Recentemente poucas pesquisas foram publicadas sobre o tema OPIM. O intuito original do trabalho era estudar todo o potencial de sistemas OPIM, mas para evitar o problema da obsolescência desse termo e manter o tema do trabalho relevante em um contexto atual, os conceitos de produção compartilhada foram mais explorados. O termo “produção compartilhada” é recente e ainda há dificuldades na biblioteconomia.

Por último, há a limitação tecnológica do método de otimização. A alta quantidade de possibilidades combinada com a alta quantidade de iterações necessárias para garantir a confiabilidade dos resultados exige uma enorme capacidade de processamento do computador. O número de possibilidades aumenta exponencialmente, exigindo um cuidado no número de fábricas, produtos e processos no modelo, pois algumas unidades a mais são o suficiente para aumentar horas no tempo de processamento do computador. Caso uma grande rede de empresas pretenda aplicar periodicamente esse procedimento para manter seu plano de produção atualizado, ela deverá realizar um alto investimento em capacidade computacional e/ou criar laboratórios dedicados à simulação.

6.2 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Junto com o que já foi discutido anteriormente, esta pesquisa buscou preencher algumas lacunas da literatura disponível sobre novos sistemas de produção compartilhada. A simulação tem a função de substituir dados empíricos, que são escassos nessa linha de pesquisa, e permitiu atualizar a teoria sobre *One Product Integrated Manufacturing* para um novo contexto, considerando os avanços da tecnologia de informação e dos sistemas ciber-físicos.

Este trabalho também buscou reduzir o nível de subjetividade e complexidade durante o processo de seleção dos membros da rede, introduzindo novas ferramentas às fases de formação e projeto do ciclo de vida das redes de empresas e mostrando como a tecnologia pode ser benéfica para a confiança e colaboração entre os parceiros.

Por fim, a comparação da aplicação do procedimento em um caso real com a aplicação em sistemas teóricos e aleatórios aumenta a credibilidade de toda a contribuição teórica desenvolvida neste trabalho.

e no trabalho de autores que não conseguiram provar suas teorias, visto que muitos dos resultados convergem para o resultado esperado, ou para o senso comum.

6.3 PESQUISAS FUTURAS

Uma possível próxima etapa da pesquisa seria a de adicionar um valor financeiro às operações do sistema. Quando os recursos estão vinculados aos custos de fabricação, é possível identificar novos indicadores e otimizar o sistema em função de outros objetivos. A simulação permitiria comparar o custo de produção e transporte com o custo de atrasos na entrega (ou de pedidos não atendidos) a fim de identificar a rota mais rentável.

A utilização de ferramentas de simulação pode substituir antigos métodos de custeio, tendo em vista que o *software* consegue identificar quanto recurso é gasto pelos produtos.

Outros elementos que podem ser adicionados para aprimorar o modelo são taxas de refugo e retrabalho, custo dos *buffers* de produção e gestão do fluxo de informação. Aumentar a fidelidade do modelo computacional em relação ao real aumenta a confiabilidade e a precisão das informações, porém também exige maior capacidade de processamento do computador. É necessário encontrar a melhor razão entre precisão e tempo disponível antes de iniciar uma simulação de processos.

Outro fator a ser levado em consideração para aprofundamento em futuras pesquisas são os custos de transação, que são os custos de definem se a empresa deve terceirizar ou ser responsável pela própria produção. São os custos que resultam de qualquer tipo de troca e podem ser divididos em três categorias, segundo Dahlman (1979): (i) Custos de procura e informação, (ii) Custos de barganha e (iii) Custos de policiamento e execução.

Bylund (2015) utiliza simulação baseada em agentes para comparar a teoria de custos de transação de Coase (1937) com a de Williamson (1975). Já Zhang et al. (2016) utiliza o método de Monte-Carlo para simular um problema de seleção de portfólio com custos de transação, enquanto Cannon et al. (2014) discute como a simulação pode incorporar os custos de transação na função de custo de marketing. Esses trabalhos poderão servir como uma base para a implantação desses custos em problemas de simulação de redes de empresas e produção compartilhada em projetos futuros.

Consequentemente, junto ao aprofundamento da pesquisa com os custos de transação, deve-se estudar melhor a participação dos brokers, por serem grandes influenciadores nos custos de transação. É a partir deles que se iniciam os custos de compras, vendas, entregas, informação e negociações (COGGAN et al.; 2013). Os *brokers* também atuam como o evento que inicia o processo de produção e transporte e são o centro da gestão de informação, significante em métodos de simulação.

Em um ponto de vista teórico, outra oportunidade seria uma pesquisa para identificar quais fatores contribuem ou prejudicam a implantação desse sistema e o que ações são necessárias que essa implantação seja possível. Também é possível ampliar a amostra de empresas virtuais analisadas, bem como realizar entrevistas e questionários com as empresas para obter mais dados.

Por último, a fim de explorar o potencial tecnológico da Indústria 4.0, trabalhos futuros poderão integrar as ferramentas de simulação com sensores e dispositivos vinculados a máquinas e produtos, como *softwares* de monitoramento da produção e tecnologia RFID. A transmissão *online* em tempo real dos dados da fábrica para um modelo virtual permite uma resposta instantânea às adversidades encontradas no processo de manufatura, enquanto os dados fabris atualizados permitem uma previsão baseada em simulação muito mais precisa e confiável.

BIBLIOGRAFIA

- ALEXANDER, B.; TATIANA, K.; SVETLANA, U. Formation of industrial clusters using method of virtual enterprises. *Procedia Economics and Finance*, v. 5, p. 68-72, 2013.
- AZADEH, A.; RAOOFI, Z.; HAGHNEVIS, M.; MADADI, M. A unique fuzzy simulation approach for concurrent improvement of customer satisfaction in integrated information and production processes with ambiguity. *Concurrent Engineering*, v. 20, n. 4, p. 287-299, 2012.
- BABIC Z; PLAZIBAT N. Ranking of enterprises based on multicriteria analysis. *International Journal on Production Economics*; v. 56–57; p. 29–35; 1998.
- BANKS, J. et al. *Verification and validation of simulation models*. Discrete-event system simulation, 3rd Edition, Prentice-Hall, Upper Saddle River (NJ), p. 367-397, 2001.
- BANKS, J.; CARSON J.; NELSON B.L.; NICOL, D. *Discrete-event system simulation* (4th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005.
- BENEDETTINI, O.; TJAHHONO, B. Towards an improved tool to facilitate simulation modelling of complex manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 43, n. 1-2, p. 191-199, 2009.
- BREMER, C. F. Um sistema para apoio à formação de empresas virtuais baseada em recursos de chão-de-fábrica. *Gestão & Produção*, São Carlos, SP, Brasil, v. 6, n. 2, p. 79-86, 1999.
- BREMER, C. F.; MICHILINI, F. V.; SIQUEIRA, J. E.; ORTEGA, L. M. VIRTEC: An example of a Brazilian virtual organization. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 12, n. 2, p. 213-221, 2001.
- BREMER, C. F.; MOLINA, A.; ORTEGA, L. M. Virtual organization models: Brazil and Mexico. *Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, São Paulo, USP, v. 20, 2000.

BRETTEL, M.; FRIEDERICHSEN, N.; KELLER, M.; ROSENBERG, M. *How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective.*

International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, v. 8, n. 1, 2014, p. 37-44.

BROWNE, J.; SACKETT, P. J.; WORTMANN, J. C. Future manufacturing systems: towards the extended enterprise. *Computers in industry*, v. 25, n. 3, p. 235-254, 1995.

BYRNE, M. D.; HOSSAIN, M. M. *Production planning: An improved hybrid approach.* International Journal of Production Economics, v. 93-94, 2005, p. 225-229.

BUSI, M.; BITITCI, U. S. Collaborative performance management: present gaps and future research. *International Journal of Productivity and Performance Management*, v. 55, n. 1, p. 7-25, 2006.

BYLUND, P. L. Signifying Williamson's Contribution to the Transaction Cost Approach: An Agent-Based Simulation of Coasean Transaction Costs and Specialization. *Journal of Management Studies*, v. 52, n. 1, p. 148-174, 2015.

CALMANOVICI, C. E. A inovação, a competitividade e a projeção mundial das empresas brasileiras. *Revista USP*, n. 89, p. 190-203, 2011.

CAMARINHA-MATOS, L. M.; AFSARMANESH, H. *Virtual enterprises: life cycle supporting tools and technologies.* In: MOLINA, A.; KUSIAKA, A.; SÁNCHEZ, J. M. (Ed.). *Handbook of life cycle engineering: concepts, models and technologies.* Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, p. 535-571, 1997.

CAMARINHA-MATOS, L. M.; AFSARMANESH, H. The Virtual Enterprise Concept. In: *Infrastructures for Virtual Enterprises: Networking Industrial Enterprises.* Porto, Portugal: Springer, 2013, p. 3-14.

CANNON, H. M., CANNON, J. N., KOKSAL, A., JOHNSON, A. Customer transaction costs and marketing simulations: Modeling a new relationship marketing approach. *Developments in Business Simulation and Experiential Learning*, v. 41, 2014.

CASAROTTO FILHO, N., PIRES, L. H. *Redes de pequenas e médias empresas e desenvolvimento local: estratégias para a conquista da competitividade global com base na experiência italiana.* 2^a. Ed. São Paulo: Atlas, 2001.

CHEN, S.; LEE, H.; WU, Y. Applying ANP approach to partner selection for strategic alliance. *Management Decision*, v. 46, n. 3, p. 449-465, 2008.

COASE, R. H. The nature of the firm. *Economica*, v. 4, n. 16, p. 386-405, 1937.

COGGAN, A.; BUITELAAR, E.; WHITTEN, S.; BENNETT, J. Factors that influence transaction costs in development offsets: Who bears what and why?. *Ecological Economics*, v. 88, p. 222-231, 2013.

COSTANTINO, N., DOTOLI, M., FALAGARIO, M., FANTI, M. P., & MANGINI, A. M. A model for supply management of agile manufacturing supply chains. *International Journal of Production Economics*, v. 135, n. 1, p. 451-457, 2012.

CUMMINGS, J. L.; HOLMBERG, S. R. Best-fit alliance partners: the use of critical success factors in a comprehensive partner selection process. *Long Range Planning*, v. 45, n. 2, p. 136-159, 2012.

CUNHA, M. M.; PUTNIK, G. D. One Product Integrated Manufacturing. In: *Agile Virtual Enterprises: Implementation and Management Support*. Hershey, PA: Idea Group Publishing, 2006, p. 43-45.

DAHLMAN, C. J. The problem of externality. *The journal of law and economics*, v. 22, n. 1, p. 141-162, 1979.

DEAN B., SCHNIEDERJANS M. A multiple objective selection methodology for strategic industry selection analysis. *IEEE Transactions on Engineering Management*, v. 38, p. 53–62, 1991.

DUBEY, R.; GUNASEKARAN, A. Agile manufacturing: framework and its empirical validation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 76, n. 9-12, p. 2147-2157, 2015.

ERIKSSON, U. Diffusion of discrete event simulation in Swedish industry: on the way to an increased understanding. *Chalmers University of Technology*, 2005.

YE, F.; LI, Y.. Group multi-attribute decision model to partner selection in the formation of virtual enterprise under incomplete information. *Expert Systems with Applications*, v. 36, n. 5, p. 9350-9357, 2009.

FUCHS, M. Design and implementation of value systems: the lifecycle perspective. *St. Gallen: University Of St. Gallen*, 1997.

GALDÁMEZ, E. V. C.; CARPINETTI, L. C. R.; GEROLAMO, M. C. Proposta de um sistema de avaliação do desempenho para arranjos produtivos locais. *Gestão & Produção*, v. 16, n. 1, p. 133-151, 2009.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. In: *Métodos e técnicas de pesquisa social*. Atlas, 2010.

Industrie 4.0 Working Group, *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0*, 2013.

HILBERT, M.; LÓPES, P. *The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information*. Science, v. 332, 2011, p. 60-65.

HSIEH, F.; LIN, J. Virtual enterprises partner selection based on reverse auctions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 62, n. 5-8, p. 847-859, 2012.

HUANG, E.; CHEN, S. G. Estimation of project completion time and factors analysis for concurrent engineering project management: a simulation approach. *Concurrent Engineering*, v. 14, n. 4, p. 329-341, 2006.

KANET, J. J. Weaving advanced manufacturing technology into the fabric of the business. *Research-Technology Management*, v. 41, n. 6, p. 49-55, 1998.

KANET, J. J.; FAISST, W.; MERTENS, P. Application of information technology to a virtual enterprise broker: The case of Bill Epstein.

International journal of production economics, v. 62, n. 1, p. 23-32, 1999.

KASLINGAM R, LEE C. Selection of vendors—a mixed integer programming approach. *Computers and Industrial Engineering*; v. 31, p. 347–50, 1996.

KELTON, W. D., SMITH, J. S., STURROCK, D. T., & VERBRAECK, A. Simio and Simulation: Modeling, Analysis, Applications. Learning Solutions, v. 2, 2011.

KOPETZ, H. Internet of Things. In: *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*. Springer, 2011, p. 307-323.

KUMAR, M. S.; LARSON, B.; FRANKWICK, G. Emergence of a Virtual Enterprise: An Integrated Theoretical Framework. In: FORD, B. J; HONEYCUTT Jr., E. D. (Ed.) *Proceedings of the 1998 Academy of Marketing Science (AMS) Annual Conference*. Springer, 2015, p. 316-320.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A *Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems*. Manufacturing Letters, n. 3, 2015, p. 18-23.

LIN, J. T.; CHEN, C. *Simulation optimization approach for hybrid flow shop scheduling problem in semiconductor back-end manufacturing*. Simulation Modelling Practice and Theory, v. 51, 2015, p. 100-114.

LONG, Janet C.; CUNNINGHAM, Frances C.; BRAITHWAITE, Jeffrey. Bridges, brokers and boundary spanners in collaborative networks: a systematic review. *BMC health services research*, v. 13, n. 1, p. 1, 2013.

MERKLE, M. Virtual organizations: how quality management paves the way for it. Switzerland: Institute for Technology Management, 1997.

MIKHAILOV, L. Fuzzy analytical approach to partnership selection in formation of virtual enterprises. *Omega*, v. 30, n. 5, p. 393-401, 2002.

NARASIMAHN R. An analytical approach to supplier selection. *Journal of Purchasing and Materials Management*, v. 19, p. 27–32, 1983

NIE, P.; SUN, P. Search costs generating industrial clusters. *Cities*, v. 42, p. 268-273, 2015.

NYDICK R, HILL R. Using the AHP to structure the supplier selection procedure. *Journal of Purchasing and Materials Management* v. 28, n. 2, p. 31, 1992.

OPTQUEST FOR SIMIO: Non-Commercial Academic Licence. *OptTek Systems, Inc.*, 2016.

OSSADNIK, W. AHP-based synergy allocation to the partners in a merger. *European Journal of Operational Research*, v. 88, n. 1, p. 42-49, 1996.

PARTOVI F, BURTON J, BANERJEE A. Application of the AHP in operations management. *International Journal of Operations and Production Management*, v. 10, n. 3, p. 5-19, 1990.

PEGDEN, C. D.; STURROCK, D. T. Rapid modeling solutions: introduction to simulation and Simio. *Simio Forward Thinking*, 2014.

PITHON, A. J. C. *Projeto Organizacional para a Engenharia Concorrente no Âmbito das Empresas Virtuais*. 2004. 316 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade do Minho. Guimarães: 2004.

PORTR, M. E. The competitive advantage of nations. *Harvard business review*, v. 68, n. 2, p. 73-93, 1990.

PUTNIK, G. D.; SILVA S. C. One-Product-Integrated-Manufacturing. In: AFSARMANESK, H. (Ed.). *Balanced Automation Systems: Architectures and Design Methods*. Chapman & Hall, 1995, p. 45-52.

PUTNIK, G. D. BM_Virtual Enterprise Architecture Reference Model. In: GUNASEKARAN, A. (Ed.). *Agile manufacturing strategy*, Elsevier Science, 2000.

RAMANATHAN, U. Performance of supply chain collaboration – A simulation study. *Expert Systems with Applications*, v. 41, n. 1, p. 210-220, 2014.

REZAEI, J. A two-way approach to supply chain partner selection. *International Journal of Production Research*, v. 53, n. 16, p. 4888-4902, 2015.

ROBINSON, S. Simulation: the practice of model development and use. *Palgrave Macmillan*, 2014.

SANTORO, R.; BIFULCO, A. Survey of industry case studies. In: *Virtual Organizations*. Springer US, p. 201-220, 2005.

SANTOS, L. C.; VARVAKIS, G. Redes de Pequenas e Médias Empresas: organizações virtuais vs. clusters. Foz do Iguaçu: ENANPAD, 1999.

SARACENI, A. V. et al. A comparative analysis between clustered and non-clustered companies using innovation indicators. *IFAC-PapersOnLine*, v. 48, n. 3, p. 155-160, 2015.

SARACH, L. Innovative Interpretation of Heritage Management in Industrial Clusters. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, v. 188, p. 170-173, 2015.

SARKIS, J.; TALLURI, S.; GUNASEKARAN, A. A strategic model for agile virtual enterprise partner selection. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 27, n. 11, p. 1213-1234, 2007.

SCHWAB, K. *The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond*. World Economic Forum, 2016.
<<https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/>> Acessado em: 22 de outubro de 2016.

SIMIO SIMULATION, versão 8.132: University Enterprise Edition. *Simio LLC.*, 2016.

SILVA, G. F.; FRAZZON, E. M.; CASAROTTO FILHO, N. Proposta de método de otimização-simulação para apoiar a tomada de decisão em internalização de processos produtivos. *Exacta – EP*, São Paulo, v. 13, n. 3, p. 161-172, 2015.

Sokolowski, J.A.; Banks, C.M. (2009). *Principles of Modeling and Simulation*. Hoboken, NJ: Wiley.

SPEKMAN, R.; DAVIS, E. W. The extended enterprise: a decade later. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, v. 46, n. 1, p. 43-61, 2016.

STEWART, R. *Simulation: the practice of model development and use*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004.

TALLURI, S.; BAKER, R. C.; SARKIS, J. A framework for designing efficient value chain networks. *International Journal of Production Economics*, v. 62, n. 1, p. 133-144, 1999.

TAM, M. C. Y.; TUMMALA, V. M. R. An application of the AHP in vendor selection of a telecommunications system. *Omega*, v. 29, n. 2, p. 171-182, 2001.

TANG, D., ZHENG, L., CHIN, K. S., LI, Z., LIANG, Y., JIANG, X., & HU, C. E-DREAM: A Web-based platform for virtual agile manufacturing. *Concurrent Engineering*, v. 10, n. 2, p. 165-183, 2002.

WANG, L.; TÖRNGREN, M.; ONORI, M. *Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing*. Journal of Manufacturing Systems, 2015.

WEBER, R. H.; WEBER, R. *Internet of Things: Legal Perspective*. Springer, 2010.

WILLIAMSON, O. E. Markets and hierarchies: Antitrust analysis and implications. *New York: The Free Press*, 1975.

WITCZYŃSKI, M.; PAWLAK, A. Virtual Organizations in the Electronics Sector. In: *Virtual Organizations*. Springer US, p. 221-232, 2005.

WU, N.; SU, P. Selection of partners in virtual enterprise paradigm. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, v. 21, n. 2, p. 119-131, 2005.

XIA, F.; YANG, L. T.; WANG, L.; VINEL, A. *Internet of Thing*. International Journal of Communication Systems, 2012, p. 1101-1102.

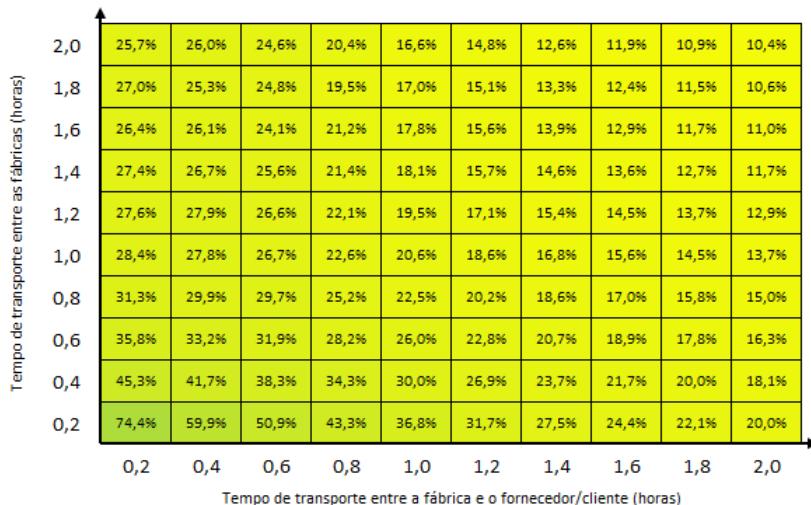
ZIMMERMMAN, F. Structural and managerial aspects of virtual enterprises. *Bamberg*: University of Bamberg, 1996.

ZHANG, R., LANGRENÉ, N., TIAN, Y., ZHU, Z., KLEBANER, F., HAMZA, K. Efficient Simulation Method for Dynamic Portfolio Selection with Transaction Cost, Liquidity Cost and Market Impact. *arXiv preprint*, 2016.

ZHANG, Y., TAO, F., LAILI, Y., HOU, B., LV, L., & ZHANG, L. Green partner selection in virtual enterprise based on Pareto genetic algorithms. *The international journal of advanced manufacturing technology*, v. 67, n. 9-12, p. 2109-2125, 2013.

APÊNDICE A – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS TEMPOS DE TRANSPORTE ENTRE FÁBRICAS

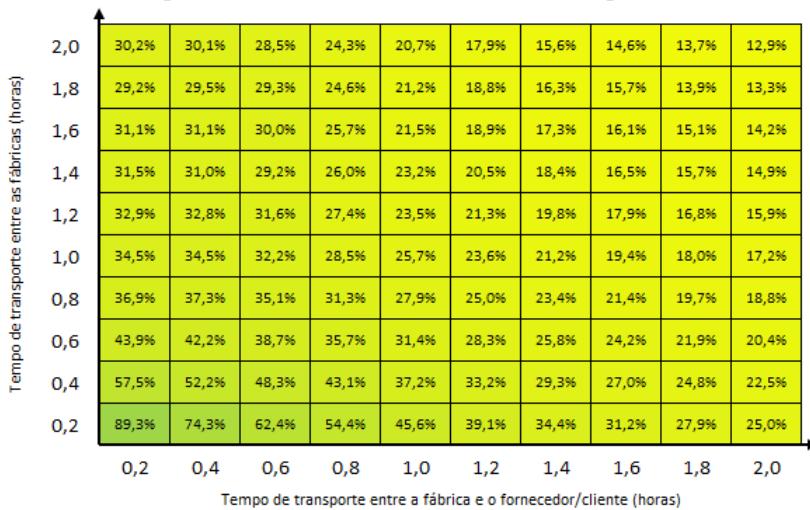
Sequência #12285 – *Takt time*: 1,00 hora por lote.



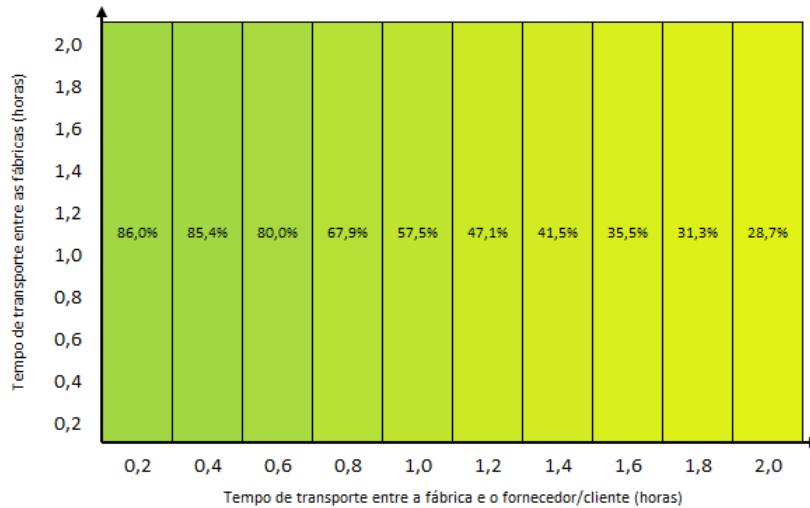
Sequência #10179 – *Takt time*: 1,00 hora por lote.



Sequência #12285 – *Takt time*: 1,25 horas por lote.



Sequência #10179 – *Takt time*: 1,25 horas por lote.

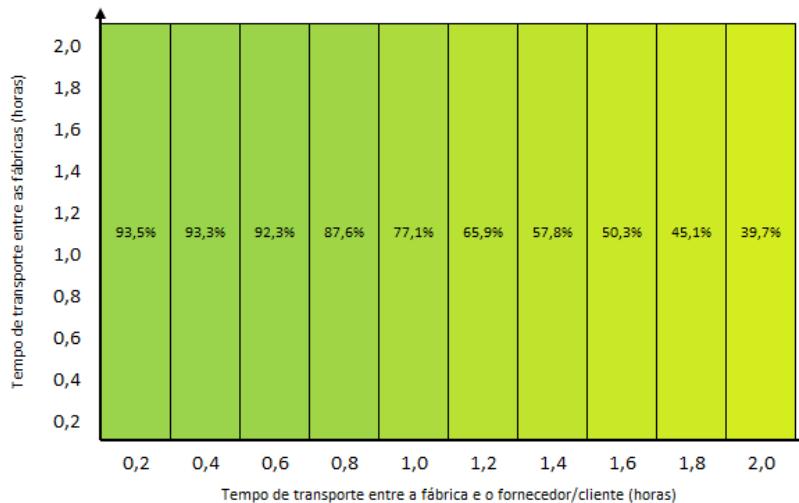


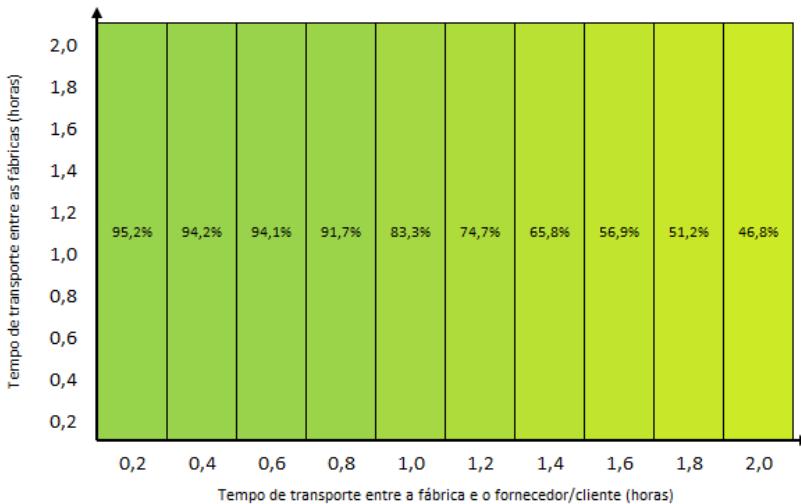
Sequência #12285 – *Takt time*: 1,50 horas por lote.Sequência #10179 – *Takt time*: 1,50 horas por lote.

Sequência #12285 – *Takt time*: 1,75 horas por lote.

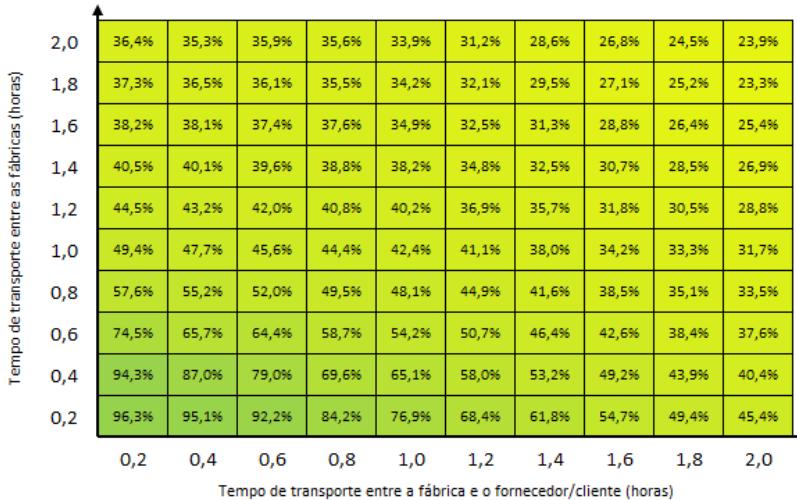


Sequência #10179 – *Takt time*: 1,75 horas por lote.

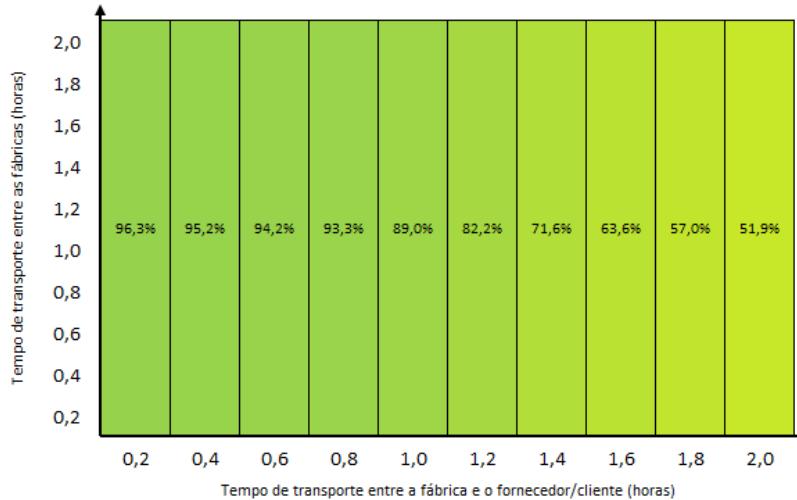


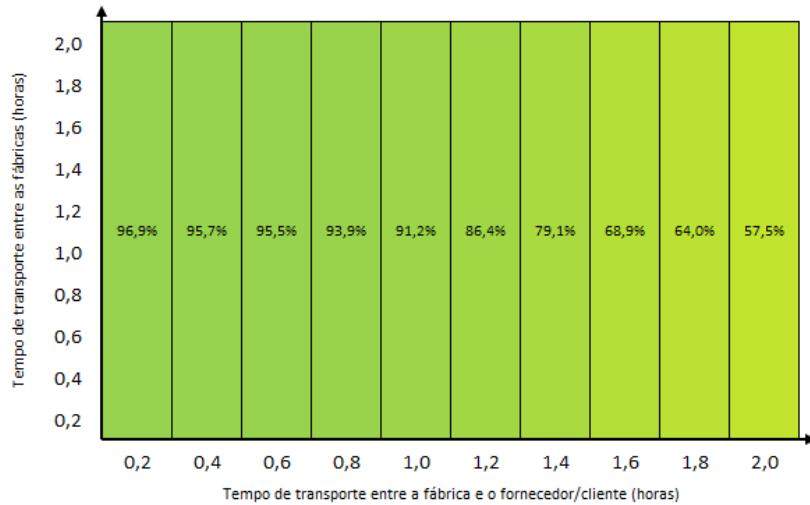
Sequência #12285 – *Takt time*: 2,00 horas por lote.Sequência #10179 – *Takt time*: 2,00 horas por lote.

Sequência #12285 – *Takt time*: 2,25 horas por lote.



Sequência #10179 – *Takt time*: 2,25 horas por lote.



Sequência #12285 – *Takt time*: 2,50 horas por lote.Sequência #10179 – *Takt time*: 2,50 horas por lote.

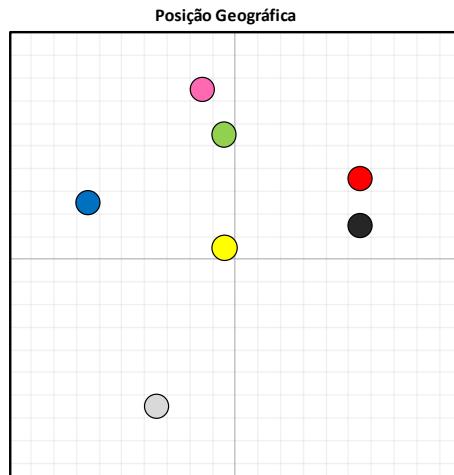
APÊNDICE B – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS GERADOS ALEATORIAMENTE

Cenário	#01
Takt Time (min)	18

Posição Geográfica (km)		
	X	Y
Fornecedor	7	17
Cliente	16	9
Fábrica 1	4	8
Fábrica 2	10	5
Fábrica 3	9	3
Fábrica 4	16	7
Fábrica 5	10	10

	Melhores Resultados		
	1º	2º	3º
Processo 1	Fábrica 5	Fábrica 5	Fábrica 5
Processo 2	Fábrica 5	Fábrica 5	Fábrica 5
Processo 3	Fábrica 4	Fábrica 4	Fábrica 2
Processo 4	Fábrica 4	Fábrica 4	Fábrica 4
Processo 5	Fábrica 2	Fábrica 3	Fábrica 4
Atend.	75,62%	75,37%	75,15%

Tempos de Ciclo (min)					
Processo	1	2	3	4	5
Fábrica 1	18	-	-	13	-
Fábrica 2	-	-	8	12	13
Fábrica 3	16	-	6	-	7
Fábrica 4	17	-	14	17	12
Fábrica 5	19	24	-	-	-

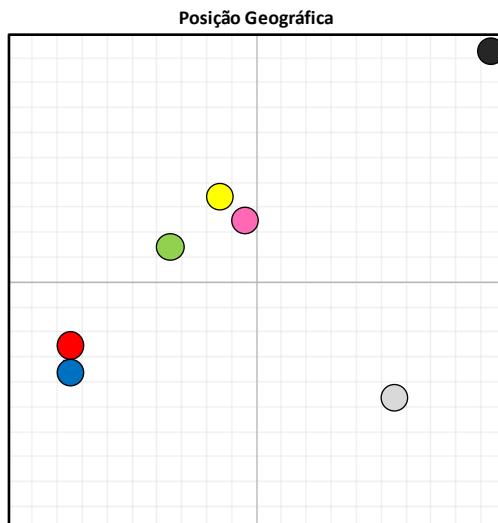


Cenário	#02
Takt Time (min)	15

Posição Geográfica (km)		
	X	Y
Fornecedor	16	15
Cliente	20	1
Fábrica 1	3	14
Fábrica 2	7	9
Fábrica 3	10	8
Fábrica 4	3	13
Fábrica 5	9	7

	Melhores Resultados		
	1º	2º	3º
Processo 1	Fábrica 4	Fábrica 4	Fábrica 4
Processo 2	Fábrica 1	Fábrica 1	Fábrica 1
Processo 3	Fábrica 1	Fábrica 5	Fábrica 1
Processo 4	Fábrica 4	Fábrica 4	Fábrica 3
Processo 5	Fábrica 2	Fábrica 2	Fábrica 2
Atend.	50,98%	50,97%	50,92%

Tempos de Ciclo (min)					
Processo	1	2	3	4	5
Fábrica 1	-	14	22	-	-
Fábrica 2	-	7	-	-	20
Fábrica 3	-	-	9	24	-
Fábrica 4	25	-	20	14	25
Fábrica 5	-	-	25	23	-



Cenário	#03
Takt Time (min)	22

Posição Geográfica (km)		
	X	Y
Fornecedor	2	2
Cliente	13	20
Fábrica 1	7	3
Fábrica 2	18	7
Fábrica 3	20	9
Fábrica 4	6	2
Fábrica 5	3	12

	Melhores Resultados		
	1º	2º	3º
Processo 1	Fábrica 5	Fábrica 5	Fábrica 5
Processo 2	Fábrica 1	Fábrica 4	Fábrica 5
Processo 3	Fábrica 3	Fábrica 1	Fábrica 1
Processo 4	Fábrica 3	Fábrica 3	Fábrica 3
Processo 5	Fábrica 2	Fábrica 2	Fábrica 2
Atend.	78,40%	77,34%	76,90%

Tempos de Ciclo (min)					
Processo	1	2	3	4	5
Fábrica 1	-	6	19	-	6
Fábrica 2	17	-	-	25	10
Fábrica 3	-	13	12	22	-
Fábrica 4	-	9	-	-	17
Fábrica 5	12	24	-	-	18

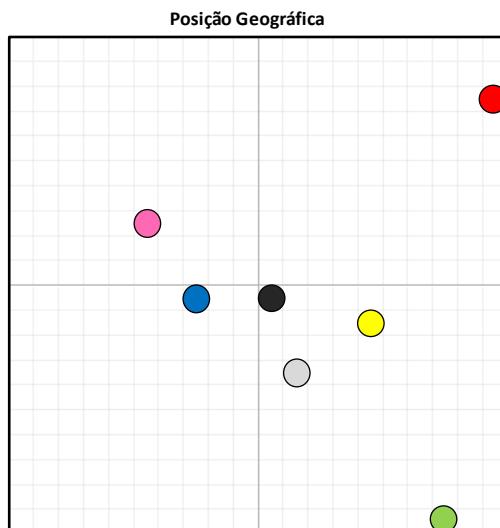


Cenário	#04
Takt Time (min)	21

Posição Geográfica (km)		
	X	Y
Fornecedor	12	14
Cliente	11	11
Fábrica 1	8	11
Fábrica 2	18	20
Fábrica 3	6	8
Fábrica 4	20	3
Fábrica 5	15	12

	Melhores Resultados		
	1º	2º	3º
Processo 1	Fábrica 5	Fábrica 5	Fábrica 5
Processo 2	Fábrica 1	Fábrica 5	Fábrica 5
Processo 3	Fábrica 1	Fábrica 1	Fábrica 5
Processo 4	Fábrica 3	Fábrica 3	Fábrica 1
Processo 5	Fábrica 1	Fábrica 1	Fábrica 1
Atend.	90,81%	90,39%	90,27%

Tempos de Ciclo (min)					
Processo	1	2	3	4	5
Fábrica 1	-	23	10	6	21
Fábrica 2	-	15	19	-	-
Fábrica 3	-	-	23	11	-
Fábrica 4	-	-	-	5	17
Fábrica 5	11	23	6	22	6



APÊNDICE C – COMPARAÇÃO DAS TAXAS DE ATENDIMENTO E CUSTOS DOS PROCESSOS

	CSR-25			CSR-30			CSR-35			CSR-40			
	Fábrica	Atend.	Custo Externo	Custo Interno	Custo Total								
#16	Joinville	64,6%	Joinville	57,9%	Joinville	56,0%	Joinville	75,0%	Joinville	75,0%	R\$ -	R\$ 95.973,50	R\$ 95.973,50
#08	Joinville	67,6%	Joinville	59,5%	Joinville	57,2%	Garuva	100,0%	Joinville	6,128,80	R\$ 90.485,00	R\$ 96.563,80	R\$ 96.563,80
#15	Garuva	100,0%	Joinville	74,9%	Joinville	69,6%	Joinville	75,0%	Garuva	17.815,20	R\$ 81.028,70	R\$ 98.843,90	R\$ 98.843,90
#07	Garuva	100,0%	Joinville	75,0%	Joinville	73,2%	Garuva	100,0%	Garuva	23.944,00	R\$ 75.490,20	R\$ 99.434,20	R\$ 99.434,20
#14	Joinville	98,6%	Garuva	100,0%	Joinville	84,7%	Joinville	100,0%	Joinville	35.029,70	R\$ 66.063,10	R\$ 101.093,00	R\$ 101.093,00
#06	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	89,0%	Garuva	100,0%	Joinville	41.158,50	R\$ 60.524,60	R\$ 101.583,00	R\$ 101.583,00
#13	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	Joinville	100,0%	Garuva	52.844,90	R\$ 51.118,30	R\$ 103.963,00	R\$ 103.963,00
#05	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	58.973,70	R\$ 45.579,80	R\$ 104.554,00	R\$ 104.554,00
#12	Joinville	100,0%	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	Garuva	57.183,40	R\$ 50.333,70	R\$ 107.577,00	R\$ 107.577,00
#04	Joinville	100,0%	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	63.312,20	R\$ 44.855,20	R\$ 108.167,00	R\$ 108.167,00
#11	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	Garuva	74.988,60	R\$ 35.448,90	R\$ 110.447,00	R\$ 110.447,00
#03	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	81.127,40	R\$ 29.910,40	R\$ 111.038,00	R\$ 111.038,00
#10	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	Garuva	92.213,00	R\$ 20.483,30	R\$ 112.596,00	R\$ 112.596,00
#02	Joinville	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	98.341,80	R\$ 14.944,80	R\$ 113.287,00	R\$ 113.287,00
#09	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Joinville	100,0%	Joinville	100,0%	Garuva	110.028,00	R\$ 5.538,48	R\$ 115.567,00	R\$ 115.567,00
#01	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	100,0%	Garuva	116.157,00	R\$ -	R\$ 116.157,00	R\$ -