

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**FABRÍCIO MOYSÉS POLATO GONÇALVES**

**ANÁLISE ORGANIZACIONAL DOS REQUISITOS DA INDÚSTRIA 4.0  
COM BASE EM MÉTODOS MULTICRITÉRIOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2**

**CURITIBA**

**2016**

**FABRÍCIO MOYSÉS POLATO GONÇALVES**

**ANÁLISE ORGANIZACIONAL DOS REQUISITOS DA INDÚSTRIA 4.0  
COM BASE EM MÉTODOS MULTICRITÉRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures

**CURITIBA**

**2016**

Fabício Moysés Polato Gonçalves

## Análise Organizacional dos Requisitos da Indústria 4.0 com base em Métodos Multicritérios

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 14 de junho de 2017.

---

Prof. Paulo Sérgio Walenia, Esp.  
Coordenador de Curso  
Engenharia de Controle e Automação

---

Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.  
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão do Curso  
de Engenharia de Controle e Automação do DAELT

### ORIENTAÇÃO

---

Eduardo de Freitas Rocha Loures, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

### BANCA EXAMINADORA

---

Jorge Assade Leludak, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Daniel Balieiro Silva, Me.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**O TERMO DE APROVAÇÃO ASSINADO ENCONTRA-SE NA COORDENAÇÃO DO CURSO**

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, os melhores professores que conheci na vida, por todo carinho e tempo investido para que eu pudesse alcançar o sucesso nas minhas escolhas.

Aos demais familiares, por todo o suporte emocional durante o meu percurso e pela confiança que depositaram em mim.

Aos amigos, pela paciência, pelos conselhos e pelos bons momentos que tornam meu caminho mais fácil e agradável.

Aos professores, que fizeram da arte de ensinar suas profissões e tanto contribuíram para o meu desenvolvimento profissional.

Ao meu orientador, Eduardo de Freitas Rocha Loures, pelo tempo e atenção disponibilizados e por todo o conhecimento dividido, sem o qual este trabalho não seria possível.

Aos colegas Luís Pierin, Maicon e Giovani que contribuíram significativamente com seus conhecimentos durante o desenvolvimento deste trabalho.

A banca examinadora, pelas críticas construtivas essenciais para alcançar a excelência deste trabalho.

*“Se andarmos apenas por caminhos já traçados,  
chegaremos apenas aonde os outros chegaram.”*

*- Alexander Graham Bell*

## RESUMO

GONÇALVES, Fabrício M. P. **Análise Organizacional dos Requisitos da Indústria 4.0 com base Métodos Multicritério.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

Desde a Primeira Revolução Industrial, as fábricas vêm agregando cada vez mais rápido as tecnologias desenvolvidas ao redor do mundo. A constante evolução tecnológica dos meios de produção garante melhorias não somente para os empresários, que veem a eficiência dos processos produtivos aumentarem enquanto os custos de confecção de seus produtos diminuem, mas também para os consumidores que passam a adquirir produtos de maior qualidade com preços mais acessíveis. Estudos indicam que atualmente as indústrias estão entrando em uma Quarta Revolução Industrial, alavancada pelo fácil acesso a serviços através da internet e pela forte conexão entre diferentes sistemas internos e externos a uma empresa. Este cenário demanda ferramentas que permitam uma avaliação diagnóstica das capacidades industriais frente aos requisitos da indústria 4.0. A partir disto, este trabalho propõe a elaboração de um modelo de avaliação, com base em métodos de análise multicritério, que auxilie os gestores a direcionar seus investimentos em áreas que levem suas empresas mais próximas dos conceitos de um modelo ideal de Indústria 4.0. Os resultados obtidos ao final deste trabalho demonstram que o modelo de avaliação criado permite de modo satisfatório avaliar diferentes setores industriais quanto ao desenvolvimento dos requisitos de uma Indústria 4.0, além de permitir também a avaliação de diferentes possíveis cenários de desenvolvimento para uma mesma empresa.

Palavras-chave: Quarta Revolução Industrial, Indústria 4.0, métodos multicritérios, AHP, PROMETHEE.

## ABSTRACT

GONÇALVES, Fabrício M. P. **Organizational Analysis of Industry 4.0 Requirements based on Multicriteria Methods**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

Since the First Industrial Revolution, factories are integrating in its plants the technologies developed around the world faster and faster. The continual technology evolution in production guarantees improvements not only for the employers, that see the efficiency of productive process increases while prices of product confection decreases, but also for the customers that start to buy products with higher quality and lower prices. Some studies show that industries are entering in the Fourth Industrial Revolution leveraged by easy access to services through internet and strong connection among different systems inside and outside industry. This scenario demands tools that allows a diagnostic evaluation of industrial capabilities that help to implement Industry 4.0. From that, this study proposes the elaboration of an evaluation model, based on multicriteria decision-making methods, that helps managers to direct their investments in areas that brings their factories closer to the concepts of an ideal Industry 4.0. The obtained results at the end of this research show that the created evaluation model allows to evaluate the development of Industry 4.0 requirements in different industrial sectors. Also, it allows to evaluate different possible scenarios of development for a single enterprise.

Keywords: Fourth Industrial Revolution, Industry 4.0, multicriteria methods, AHP, PROMETHEE.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – As quatro revoluções industriais. ....  | 13 |
| Figura 2 – Diagrama IDEF0 dos procedimentos metodológicos. ....  | 19 |
| Figura 3 - Estrutura do trabalho.....  | 20 |
| Figura 4 – Número de dados gerados por uma única máquina em uma fábrica. ....  | 23 |
| Figura 5 – Estrutura de um Cyber-Physical System.....  | 27 |
| Figura 6 – Uso de Smart Products para a criação de Cyber-Physical Systems e Sistema de Sistemas em um sistema agrícola.....                            | 28 |
| Figura 7 - Integração Horizontal e Vertical. ....  | 31 |
| Figura 9 - Classificação dos métodos de análise de decisões. ....  | 33 |
| Figura 10 - Exemplo da aplicação da estrutura hierárquica do AHP para seleção de uma casa.....   | 34 |
| Figura 11 - Índices Aleatórios de Consistência. ....   | 37 |
| Figura 12 - Funções de preferência do método PROMETHEE. ....   | 40 |
| Figura 13 - Relações de preferência e indiferença, onde P indica preferência e I indica indiferença. ....  | 41 |
| Figura 14 - Lógica de classificação das alternativas do PROMETHEE I.....   | 41 |
| Figura 15 - Lógica de classificação das alternativas do PROMETHEE I.....   | 42 |
| Figura 16 - Relação parcial - PROMETHEE I.....   | 42 |
| Figura 17 - Relação total - PROMETHEE II. ....   | 42 |
| Figura 8 - Modelo Indústria 4.0.....   | 44 |
| Figura 18 - IDEF0 da modelagem e aplicação do modelo de avaliação .....  | 52 |
| Figura 19 - Pesos de importância relativos e fator de inconsistência (0.07759).....  | 54 |
| Figura 20 - Modelo AHP resumido no SuperDecisions. ....  | 55 |
| Figura 21 - Modelo AHP expandido. ....   | 57 |
| Figura 22 – Figura mostrando a importância de cada Technology Enabler (colunas) em cada um dos oito grupos conceituais da Indústria 4.0 (linhas). .... | 58 |
| Figura 24 - Função V-Shape de Preferência para o Método PROMETHEE. ....  | 60 |
| Figura 25 – Figura retirada do software Visual PROMETHEE representando o modelo PROMETHEE criado. ....   | 61 |
| Figura 23 – Comparação paritária retirado do software SuperDecisions. ....   | 63 |
| Figura 26 - Método de Análise PROMETHEE I.....   | 68 |
| Figura 27 – Método de Análise PROMETHEE II.....  | 69 |
| Figura 28 - Fluxos de rede e fluxos positivo e negativo. ....  | 69 |
| Figura 29 - Gráfico com os fluxos de preferência por critério. ....  | 71 |
| Figura 30 - Gráfico dos pesos de cada critério.....  | 72 |



## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Escala de comparações definida por Saaty. ....   | 35 |
| Tabela 2 – Tabela Excel com todos os pesos de importância dos atributos, critérios e subcritérios retirados do modelo AHP.....                    | 65 |
| Tabela 3 - Escala utilizada para avaliação dos Technology Enablers necessários para implementação da Indústria 4.0 no setor automobilístico. .... | 66 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

CLP – Controlador Lógico Programável  
IoT – Internet of Things  
M2M – Machine-to-Machine  
CPS – Cyber-Physical System  
IHM – Interface Humano-Máquina  
AHP – Analytic Hierarchy Process  
TOPSIS – Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution  
PROMETHEE – Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations  
NIST – National Institute of Standards and Technology  
SaaS – Software as a Service  
PaaS – Platform as a Service  
IaaS – Infrastructure as a Service  
CPPS – Cyber-Physical Production System  
MMAD – Métodos Multicritério de Apoio a Decisão  
MCDM – Multicriteria Decision Making

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>  | <b>12</b> |
| 1.1 TEMA DE PESQUISA   | 12        |
| 1.2 PROBLEMA E PREMISSAS   | 15        |
| 1.3 JUSTIFICATIVA  | 16        |
| 1.4 OBJETIVOS  | 17        |
| 1.4.1 Objetivo Geral   | 17        |
| 1.4.2 Objetivos Específicos                                      | 17        |
| 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS                                  | 18        |
| 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO  | 20        |
| <b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>                                     | <b>21</b> |
| 2.1 CONCEITOS: INDÚSTRIA 4.0                                     | 21        |
| 2.1.1 Manufatura Assíncrona                                      | 21        |
| 2.1.2 Big Data e Ferramentas Analíticas                          | 22        |
| 2.1.3 Nuvem (Cloud Computing)                                    | 23        |
| 2.1.4 Smart Products   | 24        |
| 2.1.5 Cyber-Physical System e Cyber-Physical Production System   | 26        |
| 2.1.6 Smart Services e Manutenção Preditiva em Tempo Real        | 29        |
| 2.1.7 Integração Vertical e Horizontal                           | 30        |
| 2.1.8 Smart Factories  | 31        |
| 2.2 CONCEITOS: MÉTODOS MÚLTICRITÉRIO DE APOIO A DECISÃO          | 32        |
| 2.2.1 AHP  | 33        |
| 2.2.2 TOPSIS   | 37        |
| 2.2.3 PROMETHEE  | 39        |
| 2.3 MODELO REFERENCIAL DA INDÚSTRIA 4.0                          | 43        |
| 2.3.1 Smart Products   | 45        |
| 2.3.2 Smart Services   | 46        |
| 2.3.3 Extended Innovation  | 46        |
| 2.3.4 Connected Lifecycle Innovation                             | 47        |
| 2.3.5 Agile Collaboration Networks                               | 47        |
| 2.3.6 Connected Supply Chain                                     | 48        |
| 2.3.7 Decentralized Production Control                           | 48        |
| 2.3.8 Data-driven Operational Excellence                         | 49        |
| 2.3.9 Technology Enablers  | 49        |
| <b>3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE AVALIAÇÃO VIA MÉTODOS MMAD</b> | <b>51</b> |
| 3.1 MODELAGEM AHP  | 53        |
| 3.2 MODELAGEM PROMETHEE  | 58        |
| <b>4 APLICAÇÃO DO MODELO DE AVALIAÇÃO E RESULTADOS</b>           | <b>62</b> |
| 4.1 APLICAÇÃO DO MODELO AHP                                      | 62        |
| 4.1.1 Resultados do AHP  | 63        |
| 4.2 APLICAÇÃO DO MODELO PROMETHEE                                | 65        |
| 4.2.1 Resultados do PROMETHEE                                    | 67        |
| <b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>                                    | <b>74</b> |
| 5.1 CONCLUSÕES   | 74        |
| 5.2 POSSÍVEIS CENÁRIOS DE AVALIAÇÃO                              | 75        |
| 5.3 DIFICULDADES E DESAFIOS FUTUROS                              | 76        |
| <b>REFERÊNCIAS</b>   | <b>78</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

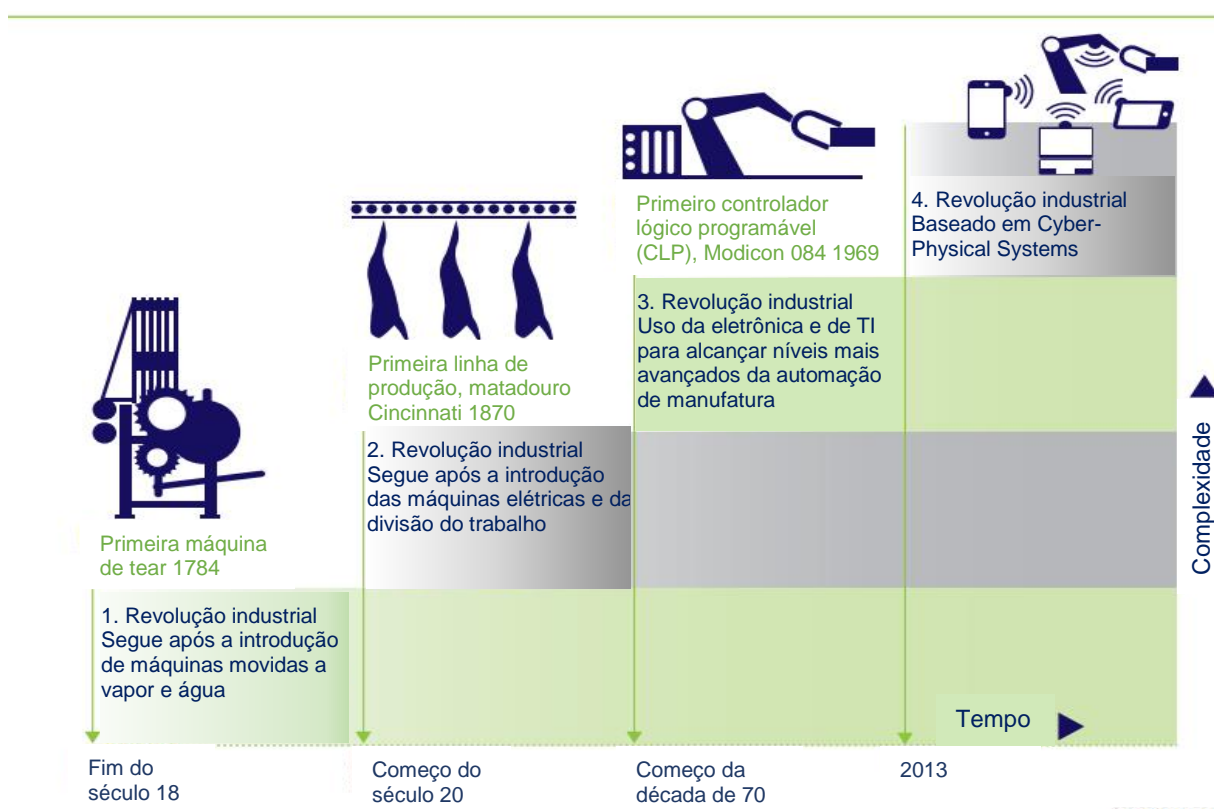
## 1.1 TEMA DE PESQUISA

Ao longo dos últimos séculos, a indústria como um todo vem passando por significantes mudanças quanto a sua estruturação e seu modo de atuação. Até o presente momento, três grandes revoluções já foram sentidas dentro do setor industrial e pesquisas indicam que uma quarta está bem perto de começar a mudar novamente a forma como as empresas atuam no mercado global.

A Primeira Revolução Industrial se deu por meados do fim do século 18, quando foi introduzida a máquina a vapor no processo de fabricação. Esse fator possibilitou uma diminuição dos processos manuais e, conseqüentemente, a aceleração da produção. A Segunda Revolução só veio a acontecer aproximadamente um século depois, com a utilização do uso da energia elétrica dentro das fábricas, a segmentação do processo de produção e a produção em massa representada principalmente pelas linhas de montagem. A terceira e última Revolução Industrial, teve início com a implementação de controladores computacionais dentro do chão de fábrica, logo após a criação do primeiro Controlador Lógico Programável (CLP) pela Modicon em 1969. Isso possibilitou maior controle das variáveis de fabricação e a introdução de robôs na linha de produção, resultando assim no aumento da eficácia do processo de fabricação e da produtividade e na diminuição de matéria-prima e nos custos do produto final (KAGERMANN et al., 2013).

De acordo com Kagermann et al. (2013), o setor industrial hoje se encontra no fim da Terceira Revolução Industrial e começa a dar passos cada vez mais largos em direção ao que está sendo chamado de Indústria 4.0, ou Quarta Revolução Industrial. O termo Indústria 4.0 foi cunhado em 2011 na Alemanha e deu nome a um projeto de inovação do setor industrial alemão conduzido por profissionais da Academia Nacional de Ciência e Tecnologia da Alemanha em parceria com o Centro de Apoio à Indústria e à Ciência e com o apoio do Ministério da Educação e Pesquisa da Alemanha (ROBLEK et al., 2016). Neste trabalho, o termo Indústria 4.0 irá se referir ao modelo industrial do futuro de forma global e não apenas se tratando do setor industrial alemão. Na figura 1, as quatro Revoluções Industriais foram separadas por tempo e grau de complexidade inseridos na indústria. Na indústria do futuro, a internet

desempenhará papel fundamental dentro do processo produtivo, desde o fornecimento da matéria-prima até a chegada do produto nas mãos do cliente. A Internet of Things (IoT) facilitará a implementação da comunicação Machine-to-Machine (M2M) dentro das fábricas, interligando cada etapa do processo de fabricação através de sensores, atuadores, controladores, Cloud Services e Cyber-Physical Systems (CPS's) (VERMESAN; FRIESS, 2014). Desta forma, a IoT proporcionará melhorias na confecção do produto, agilidade na entrega, eficiência no uso de matéria-prima e energia, e garantirá assim menores custos para o produtor e para o consumidor.



**Figura 1 – As quatro revoluções industriais.**  
**Fonte: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group (2013).**

A Indústria 4.0 sentirá enorme necessidade de um maior número de sensores e atuadores participando em toda a cadeia de produção. Isso possibilitará um controle maior por parte dos próprios sistemas de produção e abrirá oportunidades para que a inteligência artificial ganhe maior espaço e notoriedade dentro das indústrias. Com o uso de inteligência artificial, será possível fazer com que sistemas de controle autônomos tomem uma decisão quanto ao processo de fabricação tendo como

referência os dados coletados e enviados pelos vários sensores e atuadores da fábrica. Assim sendo, a indústria do futuro não somente liberará o empregador do trabalho manual como também poderá liberá-lo de um trabalho intelectual (KAGERMANN et al., 2013). A estas novas fábricas com controle inteligente e, portanto, mais autônomas dá-se o nome de Smart Factories (LASI et al., 2014).

Devido ao grande número de sensores e atuadores que serão empregados no processo de manufatura, grandes quantidades de dados serão geradas durante a confecção do produto até a entrega do mesmo ao mercado consumidor, podendo se estender até o fim da vida útil do produto na mão do cliente. Ao processo de acúmulo e análise desta enorme quantidade de dados gerados em tempo real se dá o nome de Big Data e o seu armazenamento, gerenciamento e leitura é também um fator importante dentro dos alicerces da indústria 4.0 (VERMESAN; FRIESS, 2014). Serviços de armazenamento e processamento de dados na Nuvem tem ganhado grande importância durante esta etapa do processo de inovação industrial. No entanto, a segurança quanto às informações captadas ainda gera desconfiança por parte das empresas, o que desacelera o avanço do setor industrial em direção a indústria do futuro (BLANCHET et al., 2014).

A supervisão e o gerenciamento remoto são também conceitos relevantes dentro da Indústria 4.0. Para isso, as fábricas deverão agregar aos seus sistemas físicos, sistemas digitais, que serão nada mais que a representação de todo o processo produtivo juntamente com todas as suas variáveis no universo digital. Estes sistemas, também chamados Cyber-Physical Systems, serão responsáveis pelo controle inteligente da planta através do Big Data, realizando comunicação M2M através da IoT e comunicação Humano-Máquina através de Interfaces Humano-Máquina (IHM) (SCHLECHTENDAHL et al., 2014).

## 1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

O tema Indústria 4.0 é muito recente dentro da comunidade científica, levando-se em consideração que o termo foi dito pela primeira vez em 2011 em um relatório do governo alemão sobre o futuro da indústria naquele país. Por ser um tema recente, pouco se há discutido na literatura científica sobre o assunto, tendo a maior parte dos artigos sido escrito nos últimos dois anos. Devido a este fato, não existe ainda um único modelo de Indústria 4.0 amplamente estudado e aceito com referência acadêmica. Portanto, acredita-se que a determinação de bases teóricas fundamentais para se considerar uma empresa como atuante dentro do modelo de Indústria 4.0 é essencial para que gestores possam direcionar melhor seus investimentos a fim de evoluírem suas empresas.

A notoriedade que a Indústria 4.0 tem ganhado nos últimos anos fez com que muitas empresas percebessem a real necessidade de se adaptarem rapidamente aos moldes da nova indústria. Esta preocupação é pertinente quando consideramos que as empresas que não se adequarem aos requisitos da Indústria 4.0 têm menores chances de se manterem competitivas no futuro, visto que a Indústria 4.0 proporcionará uma produção mais ágil, flexível e com menores custos. No entanto, um dos problemas encontrados atualmente, é que muitos gestores ainda encontram dificuldades em avaliar as capacidades de suas empresas e em direcionarem esforços para áreas que trarão maior evolução organizacional.

Logo, acredita-se que a criação de uma ferramenta que auxilie gestores em tomadas de decisões referentes ao desenvolvimento de uma Indústria 4.0 minimize este problema.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Estamos vivenciando a era da comunicação em uma sociedade que se torna cada vez mais globalizada e conectada. As barreiras que dificultam a comunicação estão diminuindo a cada dia e estreitando os laços entre pessoas de diferentes lugares do mundo. O poder de se conectar a qualquer um, em qualquer lugar e a qualquer hora vem mostrando agora a sua utilidade também dentro da indústria. Na indústria do futuro, a comunicação não será somente restrita a pessoas, mas se estenderá também às máquinas, sensores e atuadores e, portanto, será fundamental para garantir o bom funcionamento das operações e a redução de custos por toda a cadeia produtiva. Assim, as empresas que se adaptarem melhor e mais rápido a este modelo de indústria estarão ampliando suas chances de competição dentro do mercado.

Para garantir que esta adaptação ocorra, será necessária a atualização das tecnologias empregadas dentro das empresas e fábricas, de modo que os empresários deverão estar dispostos a investir grandes quantias de dinheiro neste projeto. No entanto, investimentos empresariais de grande valor devem sempre ser muito bem administrados para que se vise obter o máximo retorno das aplicações no menor espaço de tempo possível, ou seja, sem perdas financeiras. Por esta razão, é importante que o empresário se muna de ferramentas que o auxiliem em seus investimentos, dando-lhe uma visão mais eficaz sobre a atual situação da sua empresa com relação ao objetivo desejado.

Pensando desta forma, este trabalho propõe a elaboração de um modelo de avaliação que sirva de auxílio para empresários que queiram investir em suas empresas a fim de levá-las para dentro do modelo previsto de Indústria 4.0



## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo Geral

Através dos métodos multicritérios de apoio a decisão, analisar o potencial que uma organização apresenta para atender aos requisitos preconizados pela Indústria 4.0. Tal avaliação, também deverá permitir a identificação diagnóstica das diferentes barreiras para evolução das capacidades da organização em direção ao conceito de Indústria 4.0.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- 1) Investigar e identificar através de literatura científica os fatores e critérios fundamentais que caracterizam uma empresa como integrante no cenário da Indústria 4.0;
- 2) Investigar através de literatura científica métodos multicritério de apoio a decisão aplicáveis ao objetivo de avaliação diagnóstica;
- 3) Apresentar um modelo de avaliação com base nos métodos multicritérios de apoio a decisão escolhidos para avaliação organizacional no cenário da Indústria 4.0;
- 4) Aplicar o modelo no cenário de empresas de representatividade industrial do estado do Paraná através de especialistas.

## 1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a realização deste trabalho, inicialmente foi realizada uma forte investigação dentro da literatura existente com o intuito de se estabelecer quais são as bases que caracterizam a Indústria 4.0.

Em uma segunda etapa, outra pesquisa foi realizada, desta vez focada no entendimento dos Métodos Multicritérios de Apoio a Decisão, sendo eles: AHP, TOPSIS e PROMETHEE. Sabe-se de antemão que os métodos multicritério resumidamente tratam de dividir um objetivo principal em vários outros pequenos objetivos que quando resolvidos levam a resolução do problema final. O problema a ser resolvido durante este trabalho será a inserção de uma empresa que se encontra atualmente fora dos moldes propostos na Indústria 4.0 e queira se integrar a este modelo. Sendo assim, após a aquisição de conhecimento suficiente que possibilitou a implementação dos métodos dentro deste cenário e após identificados os conceitos fundamentais da Indústria 4.0, se iniciou a terceira etapa, onde foi feita a atribuição de valores quantitativos que caracterizam a importância destes conceitos fundamentais para a resolução do problema proposto.

Na quarta e última etapa, buscou-se a colaboração de duas empresas que já tinham o seu parque industrial bem implementado a fim de testar e comprovar dentro do modelo de Indústria 4.0 que é proposto por este trabalho, a eficiência do modelo de avaliação criado e que emprega alguns dos métodos citados a cima.

A figura 2 ilustra os procedimentos metodológicos utilizados na realização deste trabalho.

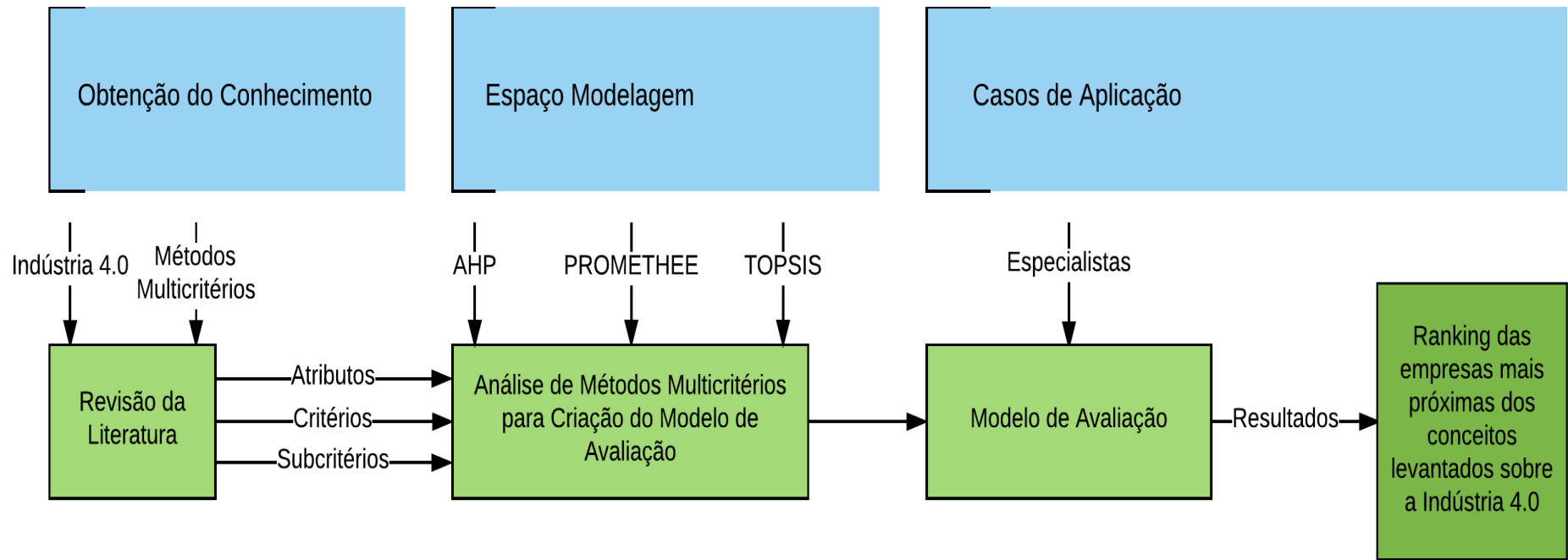
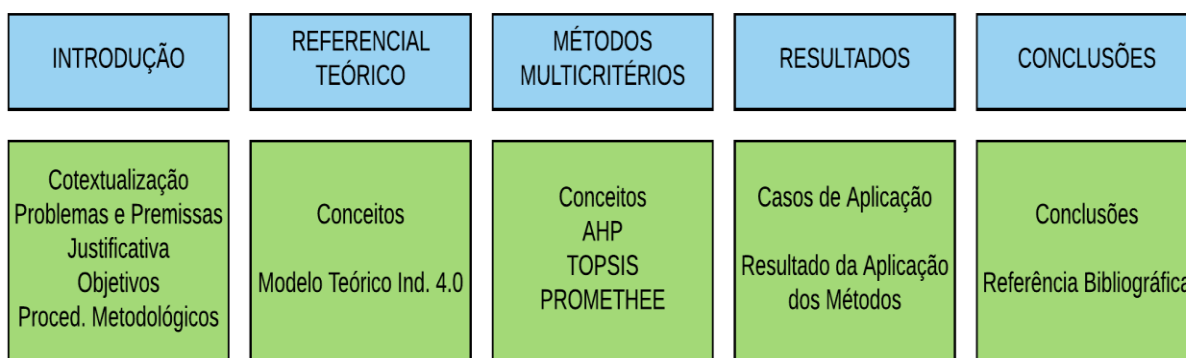


Figura 2 – Diagrama IDEF0 dos procedimentos metodológicos.  
Fonte: Autor, 2017.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Visando uma melhor apresentação do conteúdo, este trabalho foi dividido em 5 partes. O primeiro capítulo conta com a introdução dos temas abordados, apresentando preliminarmente o tema Indústria 4.0, os objetivos e a justificativa da pesquisa. No segundo capítulo estão apresentados o referencial teórico sobre Indústria 4.0 com referência científica que deram base ao que foi explorado durante o trabalho, além também de identificar dentro da literatura existente um modelo de Indústria 4.0 que melhor apresente estes conceitos e explicita atributos de avaliação. O terceiro capítulo apresenta os métodos multicritério que foram aplicados com base no modelo proposto de Indústria 4.0. O quarto capítulo detalha a aplicação dos métodos investigados em um cenário real e os resultados referentes a esta aplicação. O quinto capítulo contém a conclusão da pesquisa realizada, outros possíveis cenários de avaliação que não foram abordados por este trabalho e desafios futuros para a possível continuidade desta pesquisa. As referências bibliográficas encontram-se ao final do trabalho.



**Figura 3 - Estrutura do trabalho.**  
**Fonte: Autor, 2016.**

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 CONCEITOS: INDÚSTRIA 4.0

Nesta seção serão abordados os conceitos mais relevantes que caracterizam a Indústria 4.0, segundo a literatura científica. Os critérios para selecionar os conceitos mais relevantes foram baseados na frequência que tais termos apareceram nos estudos consultados. Destaca-se considerada importância para o artigo apresentado por Liao et al. (2017) que busca sistematizar a Indústria 4.0 através da categorização do vasto material existente sobre o tema publicado tanto pela academia quanto pela indústria.

#### 2.1.1 Manufatura Assíncrona

De acordo com Lydon (2016), a manufatura assíncrona é um dos grandes pilares da indústria do futuro. É através dela que a produção poderá migrar da forma atual, onde os produtos são confeccionados segundo um planejamento pré-estabelecido e pouco tolerante a mudanças (sendo monitorado e controlado por uma única central de produção), para uma produção onde pequenos centros inteligentes (Cyber-Physical Systems) irão coordenar cada passo da cadeia produtiva, “informando cada máquina e operador, através do uso de tecnologia de rastreamento, o próximo passo a ser realizado para produzir o produto customizado”. Esta característica irá prover à indústria uma maior flexibilidade quanto à confecção de projetos, já que os Cyber-Physical Systems (CPS) poderão reduzir a produção a lotes de até uma única unidade. Indo de acordo com esta ideia, Bauer et al. (2015) diz que as indústrias deverão adquirir um alto nível de dinamismo e susceptibilidade a mudanças, além de darem maior prioridade aos gostos do cliente para manterem-se dentro do mercado no futuro. Para que isto ocorra, o autor cita que o atual modo de produção (síncrona e centralizada) é muito devagar e custoso para alcançar esse objetivo, e, portanto, será extremamente importante que as empresas se adequem a um modo que dê maior flexibilidade à produção. Para tal, as empresas deverão adotar técnicas de modularização da cadeia produtiva. Wolter et al. (2015) diz que a manufatura assíncrona está ligada diretamente à habilidade de “auto-organização” da

linha de produção de uma indústria. Auto-organização se refere à capacidade que a linha de produção tem de se autogerir “através da comunicação entre as máquinas que integram a linha e os próprios produtos” que serão dotados de inteligência para determinarem “do que precisam para serem processados, como serão processados e para onde e como serão transportados”. O autor ainda complementa dizendo que a flexibilidade dará às empresas maiores chances de se manterem no mercado, pois possibilitará a “minimização do estoque, redução do tempo de produção e minimização do desperdício de matéria-prima”.

Uma consequência ligada à redução do tempo de produção proporcionado pela manufatura assíncrona é a habilidade que as indústrias do futuro adquirirão de produzirem em tempo real. A produção em tempo real está relacionada ao conceito de se criar produtos em pequenos lotes, podendo chegar até mesmo a lotes de uma única unidade. Esta prática evitará desperdícios da produção ligados a excessos no estoque e, conseqüentemente, trará uma redução no uso de matéria-prima. A vantagem deste modelo de produção para o consumidor é a maior liberdade que lhe será concedida para impor suas necessidades e gostos ao produto, pois uma vez que a produção será realizada em tempo real, o cliente terá várias opções para customizar o produto em interesse (WOLTER et al., 2015).

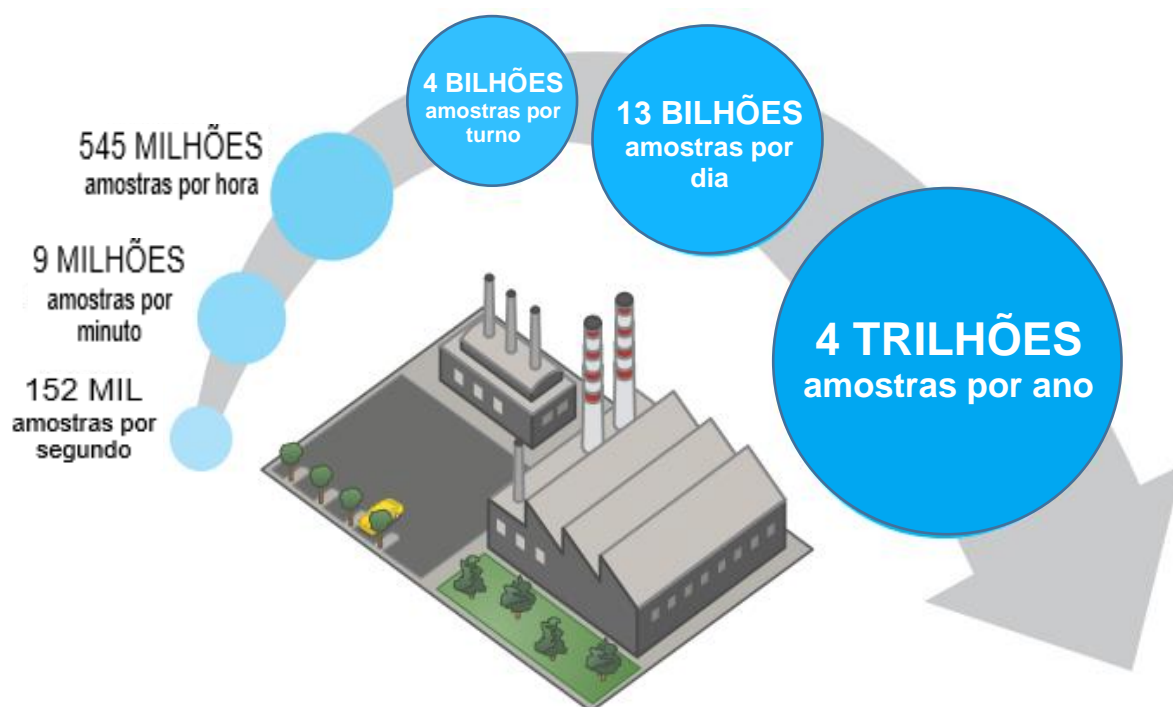
### 2.1.2 Big Data e Ferramentas Analíticas

A informação se tornou a matéria-prima fundamental para o desenvolvimento da indústria atual. É através do gerenciamento – coleta, interpretação, e uso adequado da informação – que a indústria alcançará o próximo patamar de industrialização. Big Data corresponde ao acúmulo destas informações que serão geradas em todo o processo produtivo, indo desde a fase de criação até o uso já na mão do consumidor.

De acordo com Obtiko & Jirkovsky (2015), o termo “Big Data” é utilizado quando em referência aos dados de uma empresa que vê o crescimento da sua base de dados evoluir em três dimensões, sendo elas, velocidade, volume e variedade. O autor ainda enfatiza a importância do Big Data para as empresas ao citar que, em algumas previsões, o número de informações digitais geradas pela indústria irá aumentar em até 50 vezes nos próximos cinco anos. No entanto, este aumento beneficiará apenas as empresas que souberem gerenciar este grande contingente de

dados; para isto, utilizando ferramentas poderosas na análise do Big Data (GE INTELLIGENT PLATFORMS, 2012).

Se gerenciado de forma correta, o “Big Data” servirá para aperfeiçoar todo o universo relacionado à confecção de um produto, pois ajudará empresas a tomarem decisões mais eficientes que prezem economia de recursos e satisfação do consumidor (OBTIKO; JIRKOVSKY, 2015).



**Figura 4 – Número de dados gerados por uma única máquina em uma fábrica.**  
**Fonte: GE Intelligent Platforms, 2012.**

### 2.1.3 Nuvem (Cloud Computing)

Todo o dado concentrado no Big Data deverá ser armazenado pela indústria, pois provavelmente servirá para uma próxima aplicação. No entanto, as empresas não deverão armazenar e processar estes dados somente em servidores locais, pois o armazenamento e processamento de todo o conteúdo do Big Data pela própria empresa exigiria um investimento muito grande e em curto prazo. Para contornar esta situação, Obtiko & Jirkovsky (2015) sugere que as empresas da indústria do futuro façam uso de serviços especializados em armazenamento e processamento de dados na Nuvem. A Nuvem, neste caso, se refere ao universo virtual no qual serviços serão

oferecidos tendo a internet como ambiente de trabalho. A importância da Nuvem é afirmada por Roblek et al. (2016) que diz que Computação Mobile, Computação na Nuvem e Big Data formam a base da Indústria 4.0, e que a importância do primeiro e do segundo reside no “fornecimento de serviços que podem ser acessados globalmente via Internet”.

O National Institute of Standards and Technology dos Estados Unidos (NIST) publicou em 2011 um documento onde são definidos alguns conceitos referentes à Cloud Computing. Segundo o documento, a Nuvem possui cinco características principais: (i) – oferece serviço sob demanda ao consumidor sem a necessidade da intervenção de um operador humano; (ii) – possui aplicações que podem ser acessadas a qualquer hora através de mecanismos padrões de acesso à rede (celular, tablet, laptop); (iii) – os recursos oferecidos na Nuvem (armazenamento, processamento, memória) são agrupados para servir a múltiplos consumidores; (iv) – os serviços devem possuir elasticidade, ou seja, podem ser alterados pelo consumidor a fim de atender suas necessidades, dando a impressão a ele de que os serviços possuem capacidade infinita; (v) – o uso dos recursos deve ser monitorado pelo fornecedor para que os serviços possam ser distribuídos de forma a atender todos os consumidores de forma eficaz.

Além destas cinco características, o NIST ainda define três modelos de serviços ofertados pela Nuvem. O primeiro – Software as a Service (SaaS) – o fornecedor oferece ao cliente a possibilidade de utilizar softwares específicos pela Nuvem, sem que o cliente tenha que arcar com a infraestrutura física e virtual e sem a necessidade de adquirir licenças; neste caso, o consumidor paga apenas pelo tempo de serviço. No segundo modelo – Platform as a Service (PaaS) – o cliente pode utilizar o serviço na Nuvem para criar projetos e desenvolver aplicações através do suporte de infraestrutura e software ofertados na Nuvem. O terceiro – Infrastructure as a Service (IaaS) – o consumidor pode utilizar recursos físicos do fornecedor pagando apenas pela quantidade consumida; os serviços disponíveis geralmente variam entre armazenamento, processamento e memória. (MELL; GRANCE, 2011).

#### 2.1.4 Smart Products

Produtos Inteligentes serão de grande ajuda para o crescimento da Indústria 4.0. Também chamados de Smart Products, estes produtos serão responsáveis pela



criação e aquisição de dados dos seus arredores que, posteriormente, formarão uma parte importante do Big Data. Segundo Sniderman et al. (2016) e Roblek et al. (2016), os Smart Products serão produtos constituídos de sensores e microchips – para gerenciamento de comportamento baseado no ambiente em que se encontram – e conectados à Internet das Coisas (IoT). Com estas características, os Smart Products poderão promover um aumento no desempenho do produto.

Sniderman et al. (2016) ainda cita que quando aplicações mobile são associadas aos Smart Products, eles podem melhorar a experiência que o consumidor terá com o produto. Roblek et al. (2016) confirma o conceito acima ao dizer que produtos diversos, tais como carros, camisetas e relógios se tornam inteligentes no momento em que recebem sensores que podem detectar quando, onde e como o produto está sendo utilizado. A informação então gerada pelo produto deve ser transmitida à base de dados das empresas que tenham interesse. Para que esta transmissão ocorra, será necessário que o produto tenha a capacidade de se conectar diretamente com a empresa, via IoT.

Outra possibilidade gerada pela conectividade atribuída aos produtos inteligentes é a de formação de uma rede gerenciadora de informação, onde estes produtos se tornam nós desta rede. Essa conexão entre Smart Products é nomeada de comunicação Machine-to-Machine (M2M) e também será de extrema importância para a indústria no futuro, como demonstrado por Bloem et al. (2014). Será basicamente através da comunicação M2M que os Cyber-Physical Systems poderão existir, sendo eles outro grande pilar da Indústria 4.0.

Apesar do seu papel fundamental dentro da indústria, a comunicação M2M poderá também ser de grande serventia para os consumidores. Segundo Bloem et al. (2014), algumas companhias aéreas europeias (Air France/KLM/Delta Airlines) estão próximas de aderir ao uso de eTrack e eTag para otimizar o processo de logística das bagagens de seus clientes e fornecer a eles uma experiência menos estressante. eTrack e eTag são dois componentes responsáveis pelo rastreamento e identificação mobile, respectivamente, dos produtos que fazem uso destas tecnologias.

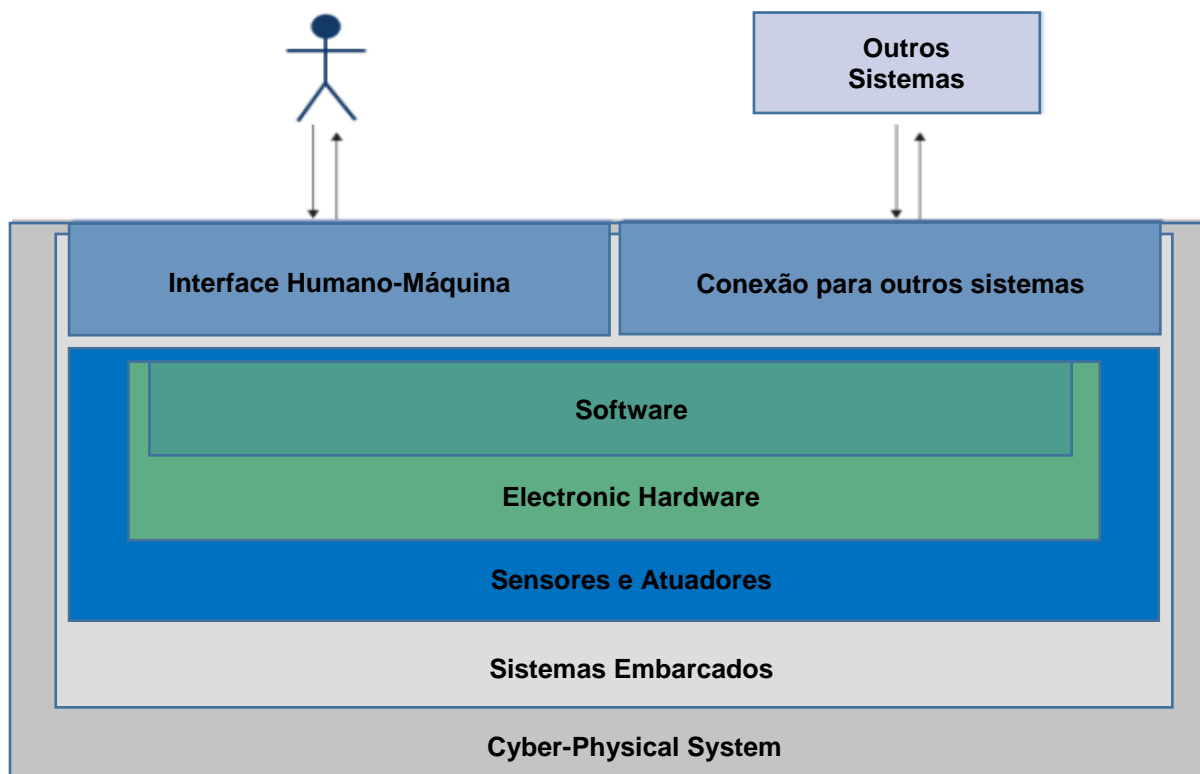
Porter & Heppelmann (2014) reforça a importância dos Smart Products ao afirmar que “toda empresa deverá encontrar um método para incorporar inteligência e conectividade em seus produtos” para sobreviver no mercado do futuro, uma vez que os Smart Products têm como objetivo aumentar a eficiência operacional das empresas, tornando-as mais atraentes para o público-alvo.

### 2.1.5 Cyber-Physical System e Cyber-Physical Production System

A utilização massiva de Smart Products pela indústria do futuro possibilitará novas formas de organização da produção dentro das fábricas. Como dito anteriormente, a produção atual é síncrona, ou seja, baseada na sincronia de diversos processos ocorrendo simultaneamente e garantindo que o produto final seja entregue em lotes e dentro do prazo estipulado. A desvantagem deste modelo é a pouca tolerância que ele tem em relação a mudanças na linha de produção. Com isto, fica quase inviável que uma empresa consiga produzir dois tipos diferentes de produtos utilizando o mesmo maquinário em um curto espaço de tempo.

Visando resolver este problema e trazer mais flexibilidade às indústrias, uma nova forma de organização, chamada de manufatura assíncrona, ganha força juntamente com o aumento do uso dos Smart Products. Para viabilizar o conceito de manufatura assíncrona, os Cyber-Physical Systems (CPS) serão extremamente importantes para a indústria, pois sem eles será quase impossível atingir este objetivo.

Roblek et al. (2016) cita que os Cyber-Physical Systems são um dos quatro principais componentes da Indústria 4.0. De acordo com Hellinger & Seeger (2011), CPS's são sistemas constituídos de equipamentos físicos (sensores, atuadores, componentes eletrônicos) que possuem software embutido e com a capacidade de processar informações, tomar decisões e agir diretamente no processo no qual estão inseridos de forma autônoma, podendo interagir com humanos (figura 3). Quando máquinas, equipamentos ou Smart Products se conectam entre si no intuito de solucionar problemas ou gerenciar processos, a rede formada por eles também pode ser considerada como um Cyber-Physical System. Algumas das características de um CPS incluem “aquisição de dados físicos através de sensores, análise de dados, tomada de decisões, ações dentro de processos através de atuadores e conexão com outros CPS's”.



**Figura 5 – Estrutura de um Cyber-Physical System.**  
**Fonte: Brettel, M. et al (2014).**

Todas estas características permitem aos CPS's otimizarem processos visando redução no tempo em que um produto leva para ser criado, redução no tempo de logística de materiais e produtos, redução de matéria-prima, redução de estoque e aumento da eficiência energética (KAGERMANN et al., 2013). Quando mais de um CPS encontra-se conectado a uma rede de CPS's, a rede formada recebe o nome de Sistema de Sistemas; dentro de um contexto de produção industrial, a rede recebe o nome de Cyber-Physical Production System (CPPS) (PORTER; HEPPELMANN, 2014) e (PÉREZ et al., 2015).

Será através dos CPPS's que a indústria encontrará a solução para adequar suas linhas de produção aos novos mercados que estão em surgimento. Dentre as diversas habilidades que os novos mercados exigirão das indústrias, está a capacidade de customização em massa. A customização em massa só será possível com o gerenciamento do Big Data por CPPS's que atuarão na modificação das linhas de produção a fim de atender as demandas dos clientes para cada produto (SALDIVAR et al., 2016)

## REDEFINING INDUSTRY BOUNDARIES

The increasing capabilities of smart, connected products not only reshape competition within industries but expand industry boundaries. This occurs as the basis of competition shifts from discrete products, to product systems consisting of closely related products, to systems of systems that link an array of product systems together. A tractor company, for example, may find itself competing in a broader farm automation industry.

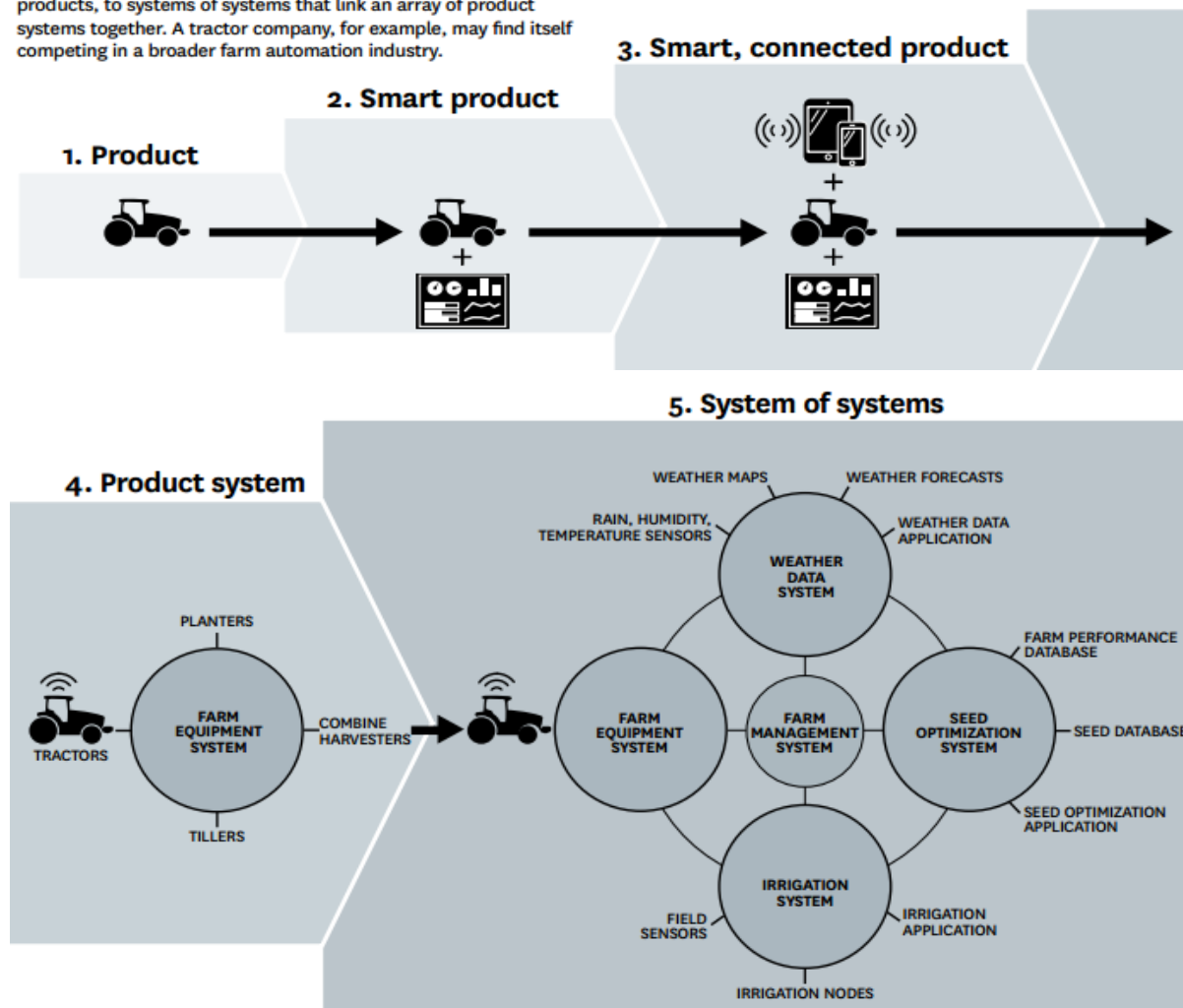


Figura 6 – Uso de Smart Products para a criação de Cyber-Physical Systems e Sistema de Sistemas em um sistema agrícola.<sup>1</sup>

Fonte: Porter, M. E. e Heppelmann, J. E. (2014).

<sup>1</sup> Do quadro número 1 ao número 3 podemos observar a evolução de um produto comum (trator) a um produto inteligente e conectado através da adição de ferramentas analíticas e mobilidade no acesso a dados. O quadro 4 mostra que a conexão deste Smart Product com outros equipamentos agrícolas (plantadeiras, colheitadeiras, cultivadores) forma um Product System (Cyber-Physical System). Por último, o quadro 5 mostra que a conexão entre vários Product Systems forma um Sistema de Sistemas. Neste caso o Sistema de Sistemas formado é o Sistema de Gerenciamento Agrícola (representado pelo círculo menor, no centro). Começando da esquerda e girando em sentido horário, temos os seguintes Product Systems conectados entre si: Sistema de Equipamentos Agrícolas, Sistema de Dados Meteorológicos (no qual estão ligados os sensores de chuva, humidade e temperatura, os mapas do tempo, as previsões do clima e as aplicações de dados do tempo), Sistema de Otimização da Semente (no qual estão ligados a base de dados de performance agrícola, a base de dados de sementes e as aplicações para otimização das sementes) e, por fim, o Sistema de Irrigação (no qual estão conectados os sensores de campo, os pontos de irrigação e as aplicações de irrigação). (Tradução do autor).

### 2.1.6 Smart Services e Manutenção Preditiva em Tempo Real

De acordo com Lee et al. (2014), as fronteiras entre produto e serviço serão modificadas pela indústria gerando uma integração entre os dois. A estratégia da nova indústria será vender não somente produtos a seus clientes, mas também oferecer a eles serviços adicionais que aumentem a eficácia de seus produtos. Para um mesmo produto, serviços diferentes podem ser ofertados a clientes diferentes, dependendo do modo como o produto está sendo utilizado. Os dados gerados por clientes e que foram armazenados no Big Data podem ser analisados para oferecer serviços customizados a cada cliente, este novo modelo de negócio é chamado de Smart Service (SNIDERMAN et al., 2016).

Como um exemplo de Smart Service, Sniderman et al. (2016) cita a empresa Uber, empresa especializada em transporte particular de pessoas em centros urbanos que utiliza dados de seus usuários para taxar a tarifa pelo percurso percorrido. Ao integrar Smart Services aos Smart Products, as empresas conseguem adicionar valores a sua cadeia de valores e, desta forma, alcançarem melhor estabilidade dentro do mercado (BLANCHET, et al. 2014).

Alguns autores definem a Manutenção Preditiva em Tempo Real como sendo um grande benefício a ser adquirido pelas indústrias do futuro. Esta tecnologia fará uso de sensores para monitorar as condições de uso da máquina e monitorar o comportamento padrão de seus componentes para prever em que momento será necessário realizar uma manutenção na linha de produção. Bloem et al. (2014) diz que a Manutenção Preditiva trará uma confiança extra e aumento de velocidade na produção em diversos setores.

Será através de Smart Services que a Manutenção Preditiva em Tempo Real ganhará uma força a mais, pois evitará que empresas industriais tenham que arcar com os custos de uma infraestrutura apenas para este fim. Bechtold et al. (2014) cita um exemplo onde a Manutenção Preditiva em Tempo Real é oferecida na forma de um serviço: uma empresa fabricante de maquinários para a indústria de tabaco identifica através de sensores alocados em seus produtos o melhor momento em que uma peça deverá ser trocada, avisando seus clientes e ofertando a eles um serviço de reposição de peças ou manutenção do maquinário.

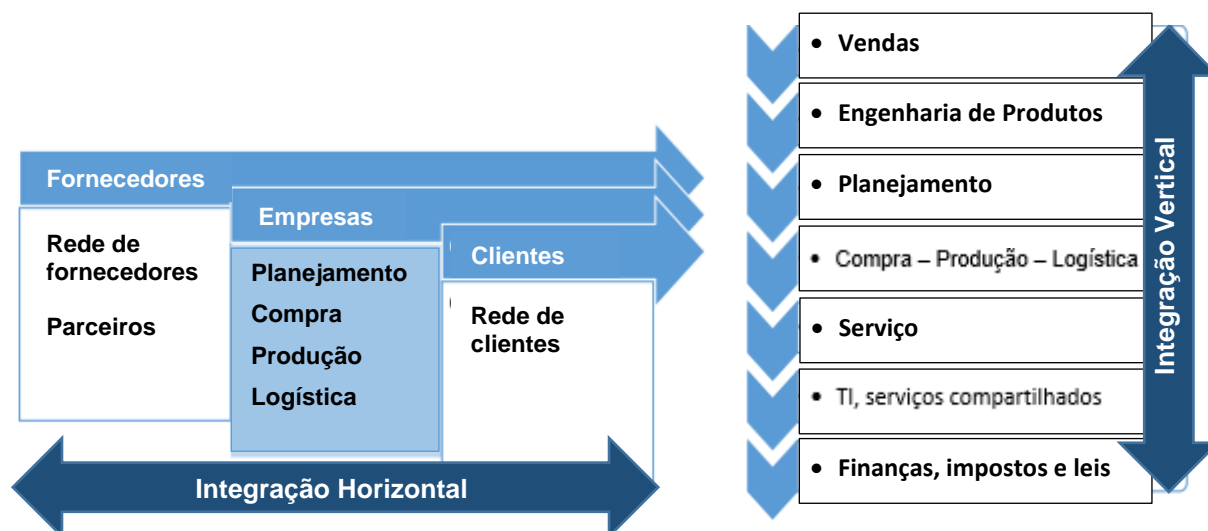
### 2.1.7 Integração Vertical e Horizontal

Em Saturno et al. (2017), artigo que trata sobre a interoperabilidade entre sistemas de automação e que tem coautoria do autor deste trabalho, é explicitado que a comunicação e a informação se mostram a base das transformações que ocorrerão na indústria atual. Sendo assim, o fortalecimento da comunicação entre setores internos das empresas também gerará um impacto positivo na indústria. Esta comunicação entre setores internos – financeiro, projetos, logística, produção, marketing – recebe o nome de Integração Vertical, e é através dela que as empresas encontrarão maneiras de reduzir custos em seus projetos e diminuir o tempo que um produto leva para sair da fase de criação e chegar até as mãos do cliente.

Em Kagermann et al. (2013), com relação à Produção e à Automação, a Integração Vertical é definida como sendo a “integração entre os vários sistemas de TI de uma empresa”, indo dos setores mais gerenciais e de negócios até os setores mais operacionais (chão-de-fábrica) (figura 7), “no intuito de gerar soluções robustas com o menor custo possível, no menor intervalo de tempo e utilizando o mínimo de recursos necessários e sem a intervenção de terceiros (solução end-to-end)”.

Por outro lado, a Integração Horizontal é definida como sendo a integração entre sistemas de TI de setores de diferentes empresas, fortalecendo a colaboração entre elas, no intuito de diminuir tempo de projeto e gerar aumento da capacidade tecnológica destas empresas sem a necessidade de novos investimentos (KAGERMANN et al., 2013) e (BRETTEL et al., 2014).

Segundo Geissbauer et al. (2016), esta prática recebe maior atenção atualmente em empresas do Japão e Alemanha que consideram a Integração Horizontal primordial para reduzir custos, aumentar a eficiência operacional e assegurar qualidade na produção. A Integração Horizontal poderá também se beneficiar de CPPS's para otimizar processos. Ao ter acesso aos projetos e planejamentos futuros da empresa (Integração Vertical), os CPPS's poderão, por exemplo, calcular de forma autônoma todos os recursos necessários para cumprir com as metas e assim entrar em contato com fornecedores e empresas parceiras para viabilizar os projetos da empresa (GEISSBAUER et al., 2016).



**Figura 7 - Integração Horizontal e Vertical.**  
 Fonte: Wolter, M. I. et al (2015).

### 2.1.8 Smart Factories

A integração de todas as tecnologias e conceitos definidos até agora em um ambiente fabril na intenção de otimizar os processos produtivos é a base do conceito das fábricas inteligentes, ou Smart Factories. Radziwon et al. (2014) define Smart Factories como sendo uma solução que prove flexibilidade e adaptabilidade aos processos produtivos para resolver problemas de forma dinâmica e reduzir os custos com matéria-prima e recursos energéticos. Alguns dos recursos que uma Smart Factory deve possuir são Máquinas Inteligentes com comunicação M2M, Processos Produtivos Inteligentes (CPPS's), Engenharia e Logística Inteligentes fundamentadas no Big Data, Big Data e Cloud Computing, Smart Grid para melhor controle do uso de recursos energéticos na produção (SHROUF et al., 2014).

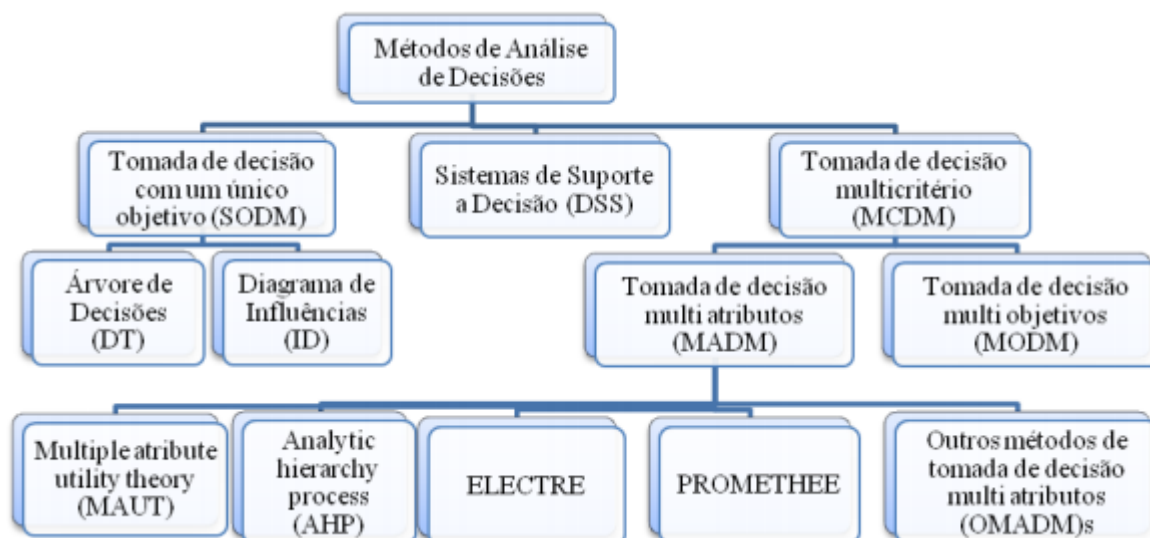
E algumas das características que as Smart Factories deverão ter com relação a forma de produção: Customização em Massa, Flexibilidade, Visão Holística e Tomada de Decisões Otimizadas, Criação de Valores Através do Big Data, Criação de Novos Serviços, Monitoramento Remoto, Manutenção Preditiva, Cadeia de Suprimentos Conectada e Gerenciamento da Energia. Desta forma, é possível concluir que as Smart Factories serão uma espécie de hub das tecnologias fundamentais para a Indústria 4.0 e que será a partir delas que a Indústria 4.0 irá se consolidar dentro dos modelos de produção (SHROUF et al., 2014).

## 2.2 CONCEITOS: MÉTODOS MÚLTICRITÉRIO DE APOIO A DECISÃO

Os Métodos Multicritério de Apoio a Decisão (MMAD ou, em inglês, MCDM – Multicriteria Decision Making) são ferramentas que auxiliam em momentos onde a decisão se torna difícil devido as alternativas disponíveis apresentarem critérios de julgamento complexos e conflitantes entre si, o que geralmente impossibilita uma análise imediata (BOAS, 2005). A aplicação destas ferramentas encontra espaço em diversas áreas, tais como decisões sobre investimentos (DE SÁ, 2012), seleção de fornecedores (ORLANDI, 2016), análises de maturidade de processos industriais (MENDES, 2016), seleção de métodos de mineração (BOGDANOVIC, 2012), planejamento energético (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2003), entre outros.

Como os métodos multicritério de apoio a decisão são diversos e variam entre si quanto às áreas em que devem ser utilizados, deve-se sempre avaliar o melhor método para cada situação, podendo em alguns casos fazer o uso de mais de um método de formas complementares (HENDRIKS, 1992). Segundo De Sá (2012), os métodos multicritério de apoio a decisão constituem o principal grupo dentre os métodos de Análise de Decisões, como mostrado na figura 9. Entre os métodos mais utilizados encontram-se o AHP/ANP, TOPSIS, PROMETHEE e ELECTRE; sendo os dois primeiros representantes da escola americana e os dois últimos pertencentes à escola francesa (DE SÁ, 2012). A figura 9 a seguir, demonstra a classificação de alguns destes métodos dentro do universo dos Métodos de Análise de Decisões.





**Figura 8 - Classificação dos métodos de análise de decisões.**  
 Fonte: ZHOU et al. (2006) apud De Sá, K. V. B. (2012).

De acordo com Boas (2005), os métodos multicritérios em geral devem passar pelas seguintes etapas:

1. Formulação do problema;
2. Determinação de um conjunto de ações potenciais (alternativas);
3. Elaboração de uma família coerente de critérios;
4. Avaliação dos critérios;
5. Determinação de pesos dos critérios e limites de discriminação;
6. Agregação dos critérios.

### 2.2.1 AHP

O método AHP (Analytic Hierarchy Process) foi inicialmente desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 70 enquanto integrante da Wharton School (SAATY, 1992). Segundo Liao et al. (2014), o processo de aplicação do método AHP deve passar por cinco etapas, que serão discutidas a seguir.

1. Definir o objetivo a ser alcançado.
2. Definir quais são as alternativas disponíveis para a solução do problema e selecionar os critérios e subcritérios que uma possível alternativa ideal

deverá apresentar; em seguida, montar uma estrutura hierárquica onde o objetivo se encontra no topo, os critérios abaixo, os subcritérios mais abaixo e as alternativas se encontram na base da estrutura, conforme figura 10.

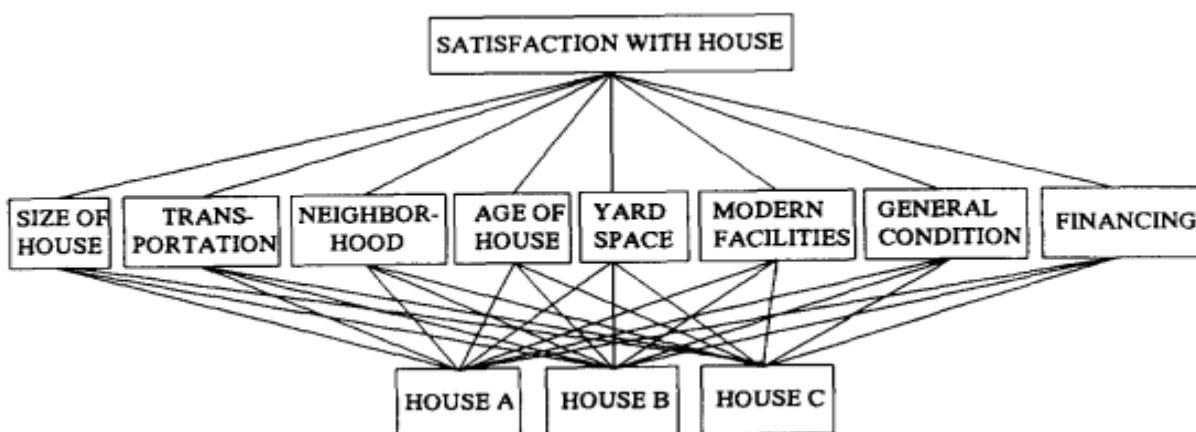


Figura 9 - Exemplo da aplicação da estrutura hierárquica do AHP para seleção de uma casa.<sup>2</sup>  
Fonte: Saaty, T. L. (1990).

3. Para cada nível hierárquico, comparar os critérios ou subcritérios integrantes par a par seguindo a escala de 1 a 9 pré-definida por Saaty e mostrada na tabela 1. Em seguida, guardar os resultados das comparações em matrizes quadradas denominadas Matriz de Comparação Paritária. A pergunta que deve ser feita ao preencher esta matriz é: "Quanto o critério ou subcritério da linha j é mais importante que o critério ou subcritério da coluna i?" (SAATY, 1992). Desta forma, Saaty (1992) diz que fica logicamente evidente que ao comparar um par de critérios e definir um valor de importância de um sobre o outro, ao realizar a comparação inversa este valor deve ser também invertido, ou seja, se é determinado que A é 5 vezes mais importante que B para a resolução do problema, então B deve ser obrigatoriamente 1/5 vezes mais importante que A. É fundamental ressaltar que quando um critério ou subcritério é comparado consigo mesmo, a comparação recebe o valor 1, uma vez que a relação de importância de um critério sobre si mesmo obedece a

<sup>2</sup> No topo da estrutura está a meta, definida neste caso como "satisfação com a casa". Abaixo encontram-se os critérios avaliados que garantem a satisfação com a casa, da esquerda para a direita: tamanho da casa, acesso por transporte, vizinhança, idade da casa, espaço do jardim, instalações modernas, condição geral, plano de pagamento. Por último, na última camada encontram-se as alternativas: Casa A, Casa B, Casa C. (Tradução do autor).

proporção 1:1. Portanto, a diagonal principal de uma Matriz de Comparação Paritária, que é onde ocorre a comparação de um critério consigo mesmo, deve ser sempre preenchida com valores 1.

**Tabela 1 – Escala de comparações definida por Saaty. Fonte: Retirado de Saaty, R. W., 1987 e traduzido livremente pelo autor.**

| Intensidade de importância em uma escala absoluta | Definição  | Explicação  |
|---|--|---|
| 1   | Igual importância                                    | As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo                        |
| 3   | Importância moderada de um sobre o outro             | A experiência ou julgamento favorece moderadamente uma atividade sobre a outra  |
| 5   | Essencial ou forte importância                       | A experiência ou julgamento favorece fortemente uma atividade sobre a outra     |
| 7   | Importância muita alta                               | Uma atividade é fortemente favorecida e sua dominância é demonstrada na prática |
| 9   | Extrema importância                                  | O favorecimento de uma atividade sobre outra é da mais alta ordem de afirmação  |
| 2,4,6,8   | Valores intermediários entre dois valores adjacentes | Valores intermediários usados quando não se tem certeza sobre o julgamento      |

4. Calcular a prioridade global de cada critério e usá-los para dar peso às alternativas disponíveis. Esta etapa pode ser subdividida em cinco passos:
  - a. Em cada coluna, some os pesos das comparações paritárias de cada critério. Sendo  $C_i$  a soma dos pesos de cada coluna, então  $C_i = \sum_{x=1}^n w_{xi}$ .
  - b. Divida o peso de cada comparação paritária pela soma de sua respectiva coluna. Sendo  $q_{ji}$  a divisão localizada na linha j & coluna i da matriz, então  $q_{ji} = w_{ji}/c_i$ .
  - c. Encontre a média da soma dos valores obtidos em cada linha após as divisões. Este valor corresponde à prioridade local do critério ou

subcritério. Sendo  $p_y$  a média dos valores de cada linha da matriz, então  $p_y = \frac{1}{n} (\sum_{z=1}^n q_{yz})$ .

- d. A prioridade global de um critério ou subcritério é calculada através da multiplicação de sua prioridade local quando comparado com os outros critérios ou subcritérios pela prioridade local da alternativa com relação aquele critério;
- e. A prioridade final de uma alternativa é dada pela soma de todas as prioridades globais dos critérios com referência à alternativa.

5. Calcular a Razão de Consistência das matrizes de comparações paritárias. Para tal, é necessário dividir esta etapa em três passos:

- a. Calcular o Autovalor Máximo da matriz. Sendo  $\lambda_{max}$  o Autovalor Máximo da matriz, então  $\lambda_{max} = \sum_{z=1}^n c_z * p_z$ .
- b. Calcular o Índice de Consistência da matriz. Sendo IC o Índice de Consistência, então:  $IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$ , onde n é o tamanho da matriz quadrada n x n.
- c. Calcular a Razão de Consistência da matriz através do Índice Aleatório de Consistência (IAC). Este índice possui valores já tabelados de acordo com o tamanho n da matriz quadrada. É possível observar alguns destes valores na figura 11 a seguir. Sendo RC a Razão de Consistência, então:  $RC = IC / IAC$ . O cálculo da Razão de Consistência nos permite saber se os valores de comparação paritários da matriz são consistentes ou não. O método AHP tolera uma inconsistência de até 10%. Sendo assim, os valores de RC devem ser menores ou iguais a 0.1. Caso este valor ultrapasse a margem permitida de 10%, deverá se realizar uma nova comparação par a par entre os critérios para se adequar os valores da matriz. Saaty (1992) enfatiza que um pouco de inconsistência entre os valores está de acordo com a realidade, pois a inconsistência é inerente ao julgamento humano.

|                                 |   |   |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>n</i>                        | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| Random consistency index (R.I.) | 0 | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 |

**Figura 10 - Índices Aleatórios de Consistência.**

Fonte: Saaty; R.W., 1987

## 2.2.2 TOPSIS

O TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) foi desenvolvido por Hwang & Yoon (1981) como um método multicritério fundamentado no fato de que a melhor alternativa a ser escolhida quando se dispõe de mais de uma opção é aquela que se aproxima mais da alternativa considerada ideal e que se distancia mais da alternativa considerada ideal negativa. Desta forma, é necessário durante as etapas do processo de aplicação deste método que se estabeleça, com base no julgamento dos critérios das alternativas disponíveis, quais seriam a melhor e a pior opção possível. De acordo com Srikrishna (2014), a aplicação deste método pode ser separada em sete etapas que serão detalhadas a seguir:

1. Definir o objetivo a ser alcançado.
2. Definir os critérios importantes para a escolha da alternativa e calcular a Matriz de Decisão. A Matriz de Decisão é uma matriz formada pelos pesos de cada critério relativos a cada alternativa. Esta matriz tem tamanho  $m \times n$ , onde cada linha  $m$  é referente a uma alternativa e cada coluna  $n$  é referente a um critério. Deve-se também atribuir os pesos a cada critério conforme a importância deles para a escolha da alternativa, para isso, seguindo uma escala definida pelo aplicador do método. Após, deve-se normalizar os pesos dividindo cada valor pela soma de todos os pesos.
3. Normalizar a Matriz de Decisão utilizando a fórmula a seguir:  $R_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}}$ , onde  $x_{ij}$  corresponde a cada elemento da Matriz de Decisão e  $n$  corresponde a cada coluna da matriz.

4. Multiplicar cada elemento das colunas da Matriz de Decisão Normalizada pelo peso característico de cada critério correspondente àquela coluna.
5. Selecionar em cada coluna da matriz os melhores ( $v_j^+$ ) e piores ( $v_j^-$ ) valores referentes a cada critério (solução ideal positiva e negativa). Então, calcular a distância euclidiana entre cada elemento da matriz e o seu elemento correspondente na solução ideal positiva e negativa. Para isto, aplicar as seguintes fórmulas para definir a distância entre cada alternativa da alternativa ideal positiva e negativa respectivamente:  $S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2}$  e  $S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2}$ , onde  $S_i^+$  e  $S_i^-$  correspondem às distâncias das alternativas em análise às alternativas ideais positiva e negativa,  $i$  corresponde a cada critério,  $m$  corresponde a cada linha da matriz,  $v_{ij}$  corresponde a cada elemento da matriz referente a uma mesma alternativa e  $v_j^+$  e  $v_j^-$  correspondem aos valores ideais positivo e negativo referentes a cada critério em análise.
6. Calcular a proximidade relativa  $C_i$  de cada alternativa para a solução ideal através da seguinte fórmula:  $C_i = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)}$ , onde  $C_i$  estará sempre contido no intervalo  $0 \leq C_i \leq 1$ .
7. Ranquear as alternativas selecionando em primeiro lugar a que apresenta a maior proximidade relativa  $C_i$  e as demais por ordem decrescente.

O TOPSIS surgiu como uma alternativa ao método ELECTRE (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2003) e se tornou uma ferramenta popular com aplicações em diversas áreas devido a sua implementação de fácil compreensão (HUANG; LI, 2012).

### 2.2.3 PROMETHEE

O método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) foi desenvolvido por Jean-Pierre Brans em 1982 e apresentado pela primeira vez durante uma conferência no Canadá (BRANS; MARESCHAL, 2005). De acordo com Brans & Vincke (1985), este método surgiu basicamente como uma alternativa mais prática e com uma aplicação mais amigável que o já difundido método ELECTRE criado por B. Roy. O PROMETHEE é considerado um método de sobreclassificação que indica o grau de dominância de uma alternativa sobre a outra, além também de permitir ao avaliador determinar a intensidade de cada alternativa com cada critério. Para a aplicação do método, Brans & Vincke (1985) sugere as seguintes etapas:

1. Montar uma matriz  $ixj$  com todos os critérios e alternativas a serem avaliados, onde  $i$  representa os critérios e  $j$  as alternativas.
2. Definir o peso  $w$  de cada critério de acordo com a influência que ele exerce para a resolução do problema.
3. Escolher dentre as funções de preferência pré-definidas pelo PROMETHEE (figura12) a que melhor se adequa a cada critério a ser avaliado. Após isto, deve-se calcular par a par entre as alternativas a diferença existente entre elas quando analisadas sobre um mesmo critério e inserir o valor desta diferença dentro da função de preferência escolhida para o critério avaliado. A resposta desta função dirá o quanto a alternativa “a” é preferível a “b”. Sendo “d” a diferença entre as alternativas “a” e “b” para um mesmo critério  $f$ , temos que:  $d = f(a) - f(b)$ .
4. Calcular o Índice de Preferência da alternativa “a” em relação à alternativa “b” através da fórmula  $\pi_{(a,b)} = \sum_{i=1}^k P_i(a, b)w_i$ , onde  $P_i(a, b)$  representa a resposta da função de preferência para o critério  $i$  e  $w_i$  o peso do critério  $i$ .

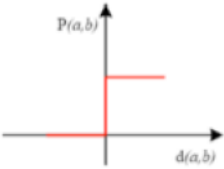
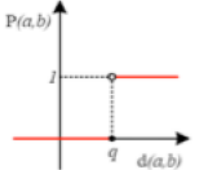
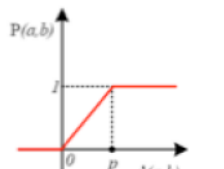
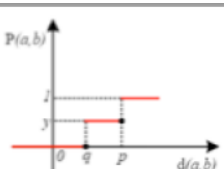
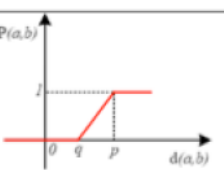
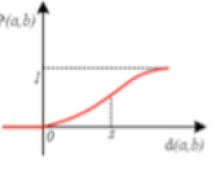
| Tipo de Função                        | Descrição   | Representação Gráfica  | Parâmetros |
|---------------------------------------|---|--|------------|
| Tipo 1<br>(Usual Criterion)           | $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1, & d > 0 \end{cases}$                                    |    | -          |
| Tipo 2<br>(U-Shape Criterion)         | $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ 1, & d > q \end{cases}$                                    |    | q          |
| Tipo 3<br>(V-Shape Criterion)         | $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ \frac{d}{p}, & 0 < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$     |    | p          |
| Tipo 4<br>(Level Criterion)           | $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ \frac{d}{p}, & q < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$     |   | q e p      |
| Tipo 5<br>(V-Shape with Indifference) | $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q}, & q < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$ |  | q e p      |
| Tipo 6<br>(Gaussian Criterion)        | $P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s}}, & d > 0 \end{cases}$              |  | s          |

Figura 11 - Funções de preferência do método PROMETHEE.

5. Calcular o Fluxo Positivo e Negativo de Preferência através das suas respectivas fórmulas:  $\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum \pi(a, x)$  e  $\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum \pi(x, a)$ , onde “a” representa uma alternativa e “x” representa qualquer outra alternativa diferente de “a”. O somatório deve ser feito entre todas as alternativas disponíveis. O fluxo positivo indica o quanto “a” é preferível sobre todas as outras alternativas “x” e o fluxo negativo o quanto as outras alternativas “x” são preferíveis sobre “a”. A figura 13 demonstra



as relações de preferência e indiferença permitidas pelo método entre duas alternativas.

$$\begin{cases} aP^+b \text{ se e somente se } \phi^+(a) > \phi^+(b), \\ aI^+b \text{ se e somente se } \phi^+(a) = \phi^+(b). \end{cases}$$

$$\begin{cases} aP^-b \text{ se e somente se } \phi^-(a) > \phi^-(b), \\ aI^-b \text{ se e somente se } \phi^-(a) = \phi^-(b). \end{cases}$$

**Figura 12 - Relações de preferência e indiferença, onde P indica preferência e I indica indiferença.**

O método PROMETHEE possui variações que são aplicadas de acordo com o tipo de problema a ser resolvido. Na etapa 6 e 7 a seguir serão mostrados como ranquear as alternativas de acordo com o método PROMETHEE I e PROMETHEE II, respectivamente.

6. Para o método PROMETHEE I, classificar as alternativas de acordo com a seguinte lógica mostrada na figura 14.

$$\left\{ \begin{array}{ll} a \text{ supera } b \text{ (a } P^{(1)} b \text{):} & \text{se } \begin{cases} a P^+ b \text{ e } a P^- b, \\ a P^+ b \text{ e } a I^- b, \\ a I^+ b \text{ e } a P^- b, \end{cases} \\ a \text{ é indiferente a } b \text{ (a } I^{(1)} b \text{):} & \text{se } a I^+ b \text{ e } a I^- b \\ a \text{ e } b \text{ são incomparáveis (a R } b \text{):} & \text{se de outra forma} \end{array} \right.$$

**Figura 13 - Lógica de classificação das alternativas do PROMETHEE I.**

7. Para o método PROMETHEE II, calcular  $\phi(a)$  – fluxo de rede – através de  $\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$  e classificar as alternativas de acordo com a seguinte lógica mostrada na figura 15.

|                                       |                 |                       |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| a supera b ( $a P^{(2)} b$ )          | se e somente se | $\phi(a) > \phi(b)$ , |
| a é indiferente a b ( $a I^{(2)} b$ ) | se e somente se | $\phi(a) = \phi(b)$ . |

Figura 14 - Lógica de classificação das alternativas do PROMETHEE I.

A diferença primordial entre estes dois métodos, está na forma como eles relacionam as alternativas umas com as outras após efetuadas todas as etapas. Em Brans & Vincke (1985) um exemplo foi fornecido para melhor entendimento dos métodos PROMETHEE I e II. As figuras 16 e 17 mostram, respectivamente, as relações entre as alternativas de acordo com os métodos I e II.

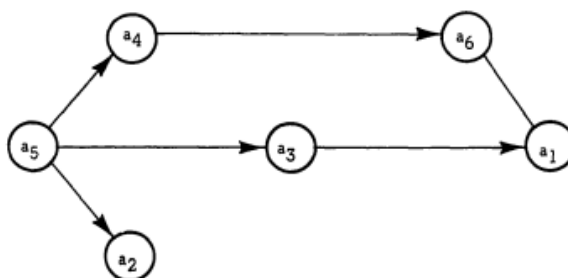


Figura 15 - Relação parcial - PROMETHEE I.  
Fonte: Brans, J. P.; Vincke Ph. (1985).



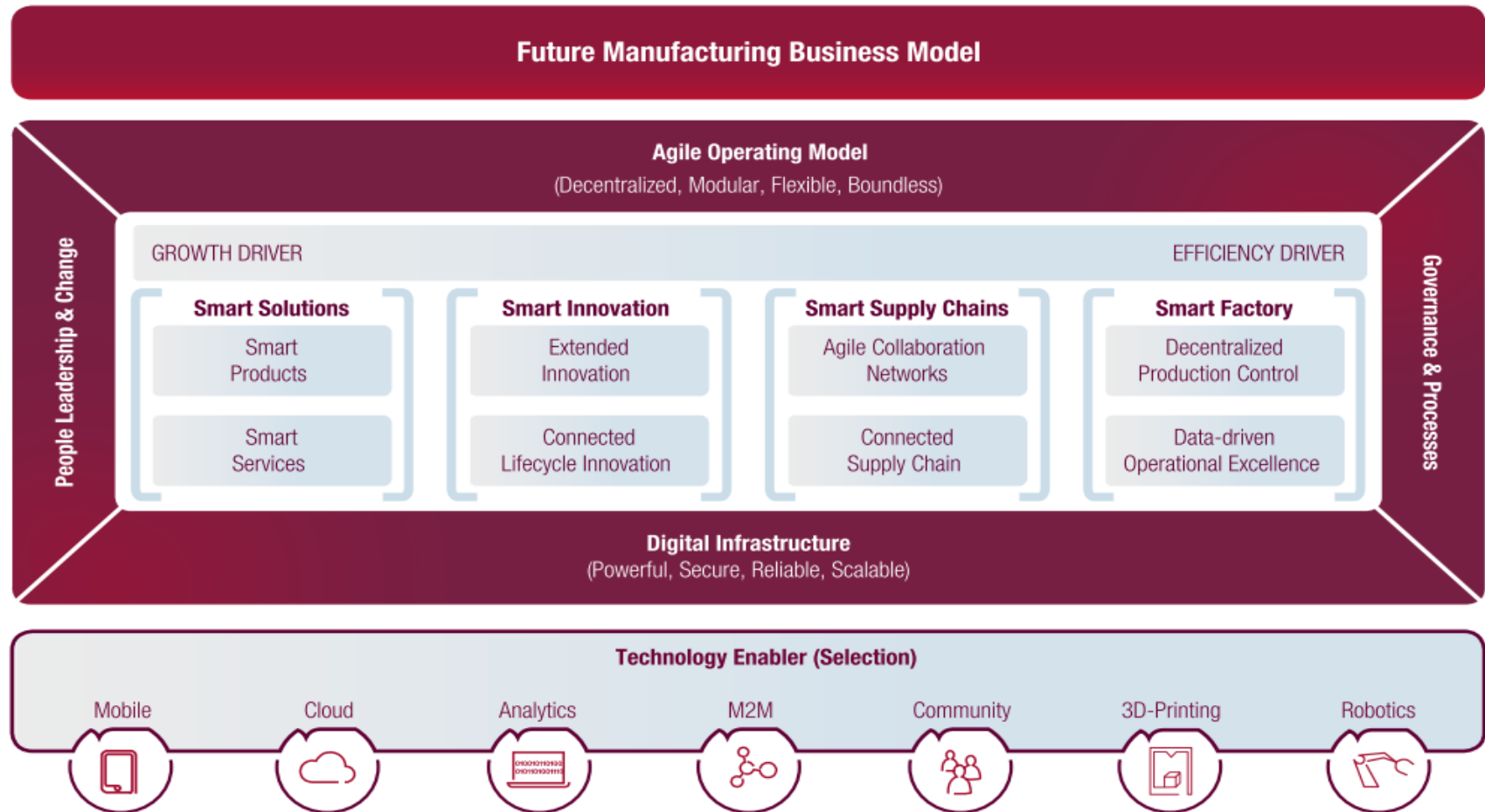
Figura 16 - Relação total - PROMETHEE II.  
Fonte: Brans, J. P.; Vincke Ph. (1985).

O método PROMETHEE I nos fornece a relação parcial entre as alternativas. Na figura 16, retirada do exemplo apresentado em Brans & Vincke (1985), é possível observar que a alternativa 5 é preferível às alternativas 4, 3 e 2, e que 4 e 3 são preferíveis à 6 e 1 respectivamente, e que, por fim, a alternativa 2 só pode ser comparada com a alternativa 5. Já o método PROMETHEE II nos fornece a relação global entre as alternativas. Na figura 17 é possível observar que a alternativa 5 é preferível as demais alternativas, mas não se pode ver a relação parcial entre as alternativas e, portanto, não se pode ter ideia, por exemplo, de que a alternativa 2 só pode ser comparada a 5.

## 2.3 MODELO REFERENCIAL DA INDÚSTRIA 4.0

Após a definição das características relevantes que sustentam o conceito de Indústria 4.0 defendido por vários estudiosos, iniciou-se a próxima etapa deste trabalho: a busca, dentro da literatura, por um modelo de Indústria 4.0 que melhor traduzisse estas características e pudesse ser utilizado de maneira satisfatória como base de conhecimento para modelagem e avaliação através dos Métodos Multicritério de Apoio a Decisão. Dentre os modelos consultados na literatura (GEISSBAUER et al. 2016), (LOM et al., 2016), (LASI et al., 2015), (WOLTER et al., 2015), (BRETTEL et al., 2014), (KAGERMANN et al., 2013), (SNIDERMAN et al., 2016), (BECHTOLD et al., 2014), optou-se pelo criado por Bechtold et al. (2014) (figura 8) uma vez que este agrupa de maneira mais completa que os outros as características consideradas mais relevantes.

## The Capgemini Consulting Industry 4.0 Framework



**Figura 17 - Modelo Indústria 4.0.**  
Fonte: The Capgemini Consulting View (2014)

No modelo proposto pela Capgemini e que será utilizado aqui, existem quatro pilares centrais que fundamentam o conceito de Indústria 4.0, são eles: *Smart Solutions*, *Smart Innovation*, *Smart Supply Chains* e *Smart Factory* (BECHTOLD et al., 2014). Cada grupo é então subdividido em mais dois grupos que serão conceituados logo abaixo, utilizando para isso as palavras da própria consultoria (traduzidos livremente pelo autor), uma vez que muitos destes conceitos já foram relatados por este trabalho na seção anterior.

Observando a figura 8, notamos mais quatro grupos que “envolvem” os quatro pilares centrais, são eles: *People Leadership & Change*, *Agile Operating Model*, *Governance & Process* e *Digital Infrastructure*. Estes grupos não serão discutidos neste trabalho e nem levados em consideração dentro do modelo adotado, pois o objetivo é focar apenas nos processos tecnológicos pertinentes à Indústria 4.0. Estes grupos, ao entender do autor deste trabalho, referem-se mais a processos organizacionais e, portanto, da área de Gestão.

Ainda na figura 8, observamos que abaixo, sustentando todo o modelo, encontra-se o grupo dos *Technology Enablers*, que por sua vez serão discutidos mais a fundo durante esta seção do trabalho. O modelo propõe também que os dois pilares centrais mais à esquerda relacionam-se com o crescimento de uma empresa (*Growth Driver*), enquanto os pilares centrais mais à direita relacionam-se com a eficiência (*Efficiency Driver*). Este conceito foi desconsiderado para a montagem do modelo que este trabalho propõe, pois assumiu-se que eles não apresentariam qualquer mudança nos resultados a serem obtidos e apenas dificultariam o entendimento do modelo. Abaixo, serão apresentadas as definições dos subgrupos de cada pilar e o que se entende por *Technology Enablers* dentro do contexto de Indústria 4.0.

### 2.3.1 Smart Products

Na visão da Capgemini, Smart Products são definidos como:

Cyber-Physical Systems equipados com sensores provendo informações sobre o meio em que se encontram e também, por exemplo, sobre o uso e status atual do produto. Os dados são ligados a um atuador que pode de forma autônoma reagir a mudanças. [...] A conectividade aderida a eles também forma a base dos CPPS's (BECHTOLD et al., 2014).

### 2.3.2 Smart Services

Na visão da Capgemini, os serviços oferecidos no futuro contarão com a ajuda de ferramentas analíticas cada vez mais poderosas, capazes de realizar decisões inteligentes, como também sugerir a melhor opção a ser tomada em um próximo passo.

Smart Services serão possíveis devido ao grande volume de dados acumulados pela indústria e ao grande potencial de processamento destes dados. A diferença entre os serviços atuais está na utilização de ferramentas cada vez mais ergonômicas. [...] Além dos serviços de Manutenção Preditiva, os Smart Services também incluirão serviços de “pague pelo o que usar”, como por exemplo, o fornecimento de máquinas para o consumidor com baixo ou nenhum custo inicial e com a subsequente tarifação pelo o uso (BECHTOLD et al., 2014).

A consultoria ainda complementa dizendo que a utilização de Smart Services atrelada aos Smart Products no futuro poderá garantir aumento da receita das empresas. “Fabricantes deverão desenvolver combinações inovadoras entre Smart Services e Smart Products para aumentar a variedade das atividades de criação de valor de suas empresas”. (BECHTOLD et al., 2014).

### 2.3.3 Extended Innovation

Extended Innovation diz respeito à inovação de produtos através da coleta de dados das comunidades internas e externas à empresa. Segundo Bechtold et al. (2014):

Extended Innovation é uma troca de informações de duas vias, com a informação fluindo de dentro para fora da empresa e de fora para dentro. Enquanto os estímulos de fora são trazidos para dentro da empresa, ela age como uma central que então distribui estas informações para dentro de um ambiente colaborativo formado com os seus parceiros. [...] Estas trocas de informações serão possíveis através das tecnologias digitais, tais como, plataformas comunitárias, ferramentas para desenvolvimento de produtos (PLM) colaborativas e recursos de conhecimento compartilhado. [...] Extended Innovation

aumentará as inovações voltadas para as necessidades e gostos do cliente (BECHTOLD et al., 2014).

### 2.3.4 Connected Lifecycle Innovation

Lifecycle Innovation se refere ao processo em que a ideia de uma inovação é submetida para se tornar real e chegar às mãos do consumidor. Ela envolve todos os setores presentes neste processo, desde os setores de Pesquisa & Desenvolvimento até o setor de Vendas. Segundo a Capgemini, este processo já acontece nas indústrias atuais, porém a diferença para as indústrias do futuro se encontra na conexão entre setores e comunidades externas, além do uso massivo de informações geradas pelos consumidores, pelas empresas parceiras e pelo próprio processo produtivo interno. Nas palavras da Capgemini:

Connected Lifecycle Innovation difere de Lifecycle Innovation pela visão holística que a primeira traz: informações relacionadas ao produto são acopladas com outros dados relevantes, tais como parâmetros do maquinário da fábrica ou dados dos pedidos dos clientes. [...] Através de Connected Lifecycle Innovation a escolha de um material pode ser otimizada por uma sistemática análise de dados do processo de produção. [...] Sistemas avançados de apoio à inovação formam a base de Connected Lifecycle Innovation. Eles devem ser acessíveis de qualquer lugar do planeta, especialmente através de aplicações mobile (BECHTOLD et al., 2014).

### 2.3.5 Agile Collaboration Networks

Por Agile Collaboration Networks, Bechtold et al. (2014) entende o que neste trabalho foi citado como Integração Horizontal. A importância deste conceito para a Indústria 4.0 está na agilidade que será adquirida pelos processos produtivos através da colaboração entre empresas, onde tarefas de um mesmo projeto são distribuídas para cada empresa parceira de acordo com a competência de cada uma. A Capgemini complementa o conceito de Agile Collaboration Networks da seguinte forma:

Uma fabricante de componentes fabris poderá decidir de forma flexível o que deve ser feito pela sua empresa e o que deve ser feito por uma empresa parceira. Isto poderia funcionar, primeiramente, entre

fornecedores de serviços de engenharia através do uso de ferramentas CAD compartilhadas, de forma que cada fornecedor possa desenvolver o módulo de um sistema específico requisitado pelo cliente. Em segundo lugar, em uma rede de companhias parceiras, onde o fabricante poderia alocar os pedidos de forma flexível para a parceira com a maior capacidade disponível no momento. [...] Gargalos na produção poderão ser evitados ao distribuir a produção entre as empresas parceiras (BECHTOLD et al., 2014).

### 2.3.6 Connected Supply Chain

Por sua vez, Connected Supply Chain diz respeito ao que neste trabalho foi previamente definido como Integração Vertical. Nas palavras da Capgemini:

Connected Supply Chain será a peça fundamental para alcançar a excelência operacional em qualquer estratégia de Indústria 4.0. De forma a gerenciar o crescimento complexo de uma cadeia de suprimentos, fluxos de produtos deverão ser mapeados continuamente. Isto será possível através de CPS's, tais como, Identificadores por Radiofrequência associados às matérias-primas e peças do produto. [...] Esta digitalização permite a automação da rotina dos processos da cadeia de suprimentos, tais como, operações de logística e estoque. [...] O primeiro impacto causado por esta prática será a visibilidade da rede de suprimentos por todo o processo. Ineficiências e riscos podem ser reconhecidos e resolvidos na fonte, ao invés de tentar remediar os sintomas das operações ineficientes (BECHTOLD et al., 2014).

### 2.3.7 Decentralized Production Control

Segundo a Capgemini, Decentralized Production Control será alcançado através da implementação de CPPS's dentro das fábricas para monitorar a produção. Os CPPS's serão capazes de tomar decisões locais de forma autônoma, portanto, descentralizando a produção.

Através de CPPS's, as Smart Factories serão compostas de unidades de produção inteligentes que conhecerão seus status atuais e os obstáculos a serem superados, conectadas a todo o ecossistema fabril. Como cada módulo de produção terá acesso às informações necessárias para tomar decisões de forma autônoma, o chão de fábrica consistirá em uma rede de agentes locais tomadores-de-decisão. [...] Decentralized Production Control dá a possibilidade de



fabricar cada produto individualmente sem custos adicionais. [...] Flexibilidade operacional e produtividade aumentarão, uma vez que as capacidades finitas da produção serão alocadas da maneira mais eficiente (BECHTOLD et al., 2014).

### 2.3.8 Data-driven Operational Excellence

Com o acúmulo gigantesco de dados gerados pela indústria e pelas comunidades externas, será possível através de ferramentas analíticas criar históricos de produção e identificar padrões visando melhorias nos processos produtivos. De acordo com Capgemini:

Data Driven Operational Excellence ajudará a alcançar níveis ainda inalcançáveis de produtividade e qualidade. Ferramentas de análise avançadas possibilitam a criação de novos modelos que visam aumentar a performance ao longo de toda a cadeia produtiva, detectando ineficiências baseadas em dados históricos e gerando hipóteses possíveis para otimização dos processos no futuro. [...] Organizações fabris futuras irão avaliar e explorar dados de forma muito mais rigorosa antes de alcançarem níveis de excelência operacional. [...] Análise de dados oferecerá vantagens competitivas. Custos poderão ser significativamente reduzidos através de processos mais eficientes de garantia de qualidade (BECHTOLD et al., 2014).

### 2.3.9 Technology Enablers

O grupo de Technology Enablers corresponde a todas as tecnologias e conceitos tecnológicos básicos que a Indústria 4.0 necessitará para se fomentar como indústria do futuro. Entre eles encontram-se *Cloud Computing*, *Mobile*, *Advanced Analytics*, *M2M*, *Advanced Robotics*, *3D Printing* e *Community Platforms*. Alguns desses conceitos e tecnologias já foram explicados neste trabalho, portanto, as explicações seguintes se concentrarão em apenas aqueles que carecem de maior atenção.

A tecnologia Mobile será um grande facilitador da Indústria 4.0. Através dela será aumentada a flexibilidade com que operadores e gerentes poderão tomar decisões importantes ou saberem de problemas na produção sem estarem efetivamente presentes na planta física da fábrica (ROBLEK et al., 2016). A conectividade de todas as outras tecnologias estará principalmente pautada na

mobilidade, além também das várias formas de interação entre empresas parceiras e outros agentes externos. Para tal, novos protocolos de comunicação deverão ser adotados pelas empresas, a fim de possibilitar esta facilidade de maneira mais segura (RODRIGUEZ, 2016).

A comunicação M2M (machine-to-machine) será outro grande viabilizador da Indústria 4.0. Utilizando a conectividade promovida pelas comunicações mobile, produtos, máquinas e sistemas comunicarão entre si, requisitando e fornecendo dados, recebendo e dando ordens, formando assim os já ditos Cyber-Physical Systems e Cyber-Physical Production Systems (WAN et al., 2013).

3D Printing será um grande trunfo da Indústria 4.0. Esta tecnologia promete dar agilidade e redução de custos às linhas de produção, além de aumentar a qualidade dos produtos. Bechtold et al. (2014) cita que através do uso de Impressoras 3D, uma fábrica poderá, por exemplo, requisitar apenas o projeto de um produto para sua matriz e imprimir a peça ou produto sem a necessidade do transporte da matriz para a filial em outra cidade ou país.

### 3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE AVALIAÇÃO VIA MÉTODOS MMAD

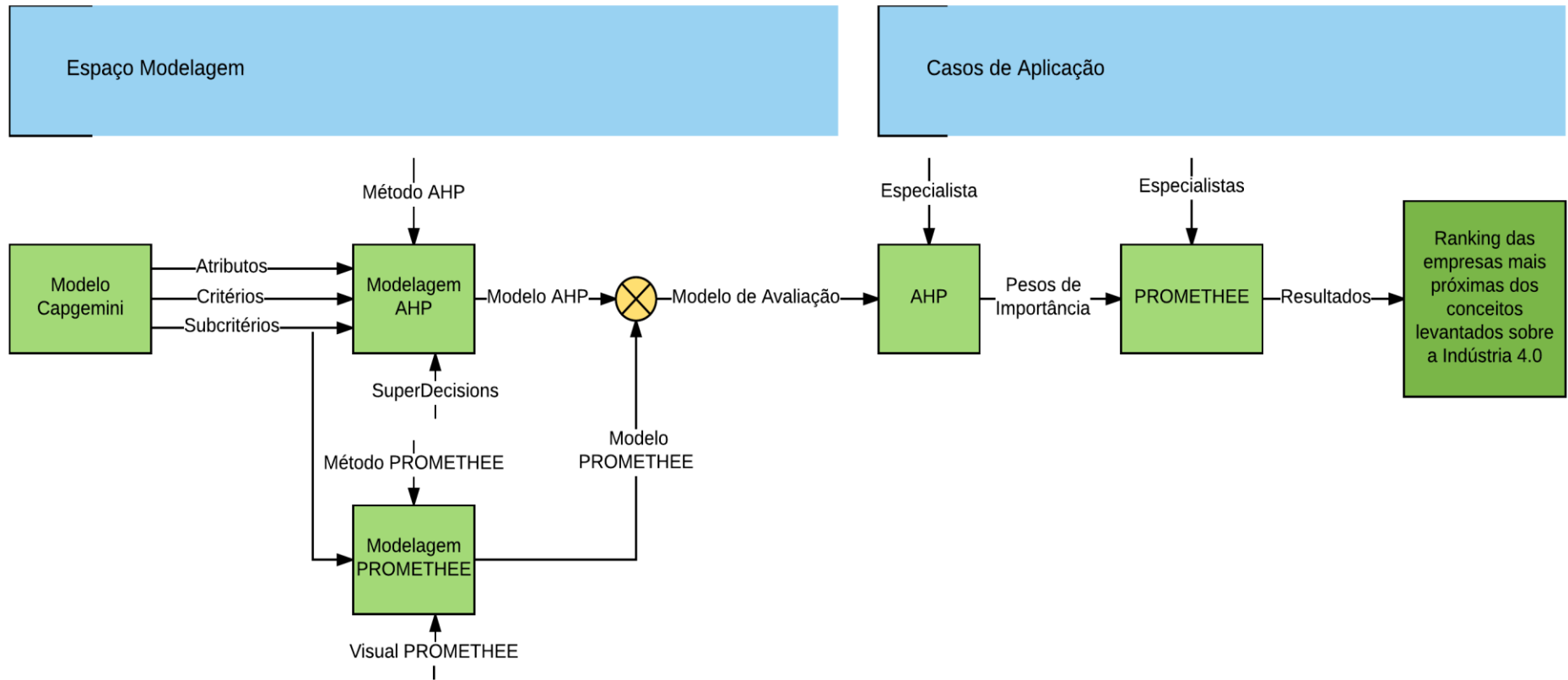
Tendo como objetivo analisar a maturidade de uma empresa a partir da perspectiva da Indústria 4.0 para então poder classificá-la, optou-se por utilizar neste trabalho os métodos AHP e PROMETHEE conjuntamente. O método TOPSIS foi excluído por utilizar a mesma forma de análise que o PROMETHEE (escolha da melhor alternativa através da comparação das distâncias euclidianas das alternativas até a solução ideal positiva); somado a isto, o PROMETHEE também oferece opções diversificadas de análises do resultado que tornam mais completa a avaliação. Dentro do modelo proposto, o método AHP foi utilizado para gerar pesos e ranquear os conceitos mais importantes da Indústria 4.0 para o setor automobilístico. Estes pesos foram utilizados como dados de entrada no PROMETHEE, que por sua vez ranqueou as empresas do setor automobilístico atuantes no Paraná segundo a ótica da Indústria 4.0 formulada pela Capgemini. A união dos dois métodos resultou na criação de um *modelo de avaliação* mais complexo e, portanto, com resultados mais abrangentes, permitindo uma análise mais completa do estudo. A figura 18 ilustra a estrutura proposta que resulta no modelo de avaliação proposto.

#### i) Modelo Indústria 4.0

O modelo utilizado como referência para a Indústria 4.0 foi o modelo da Capgemini já apresentado anteriormente neste trabalho. Com base neste modelo, foi possível realizar a modelagem dos métodos AHP e PROMETHEE para avaliação do cenário atual da indústria automobilística na região metropolitana de Curitiba, no estado do Paraná.

#### ii) Atributos, Critérios e Subcritérios

Os atributos, critérios e subcritérios das modelagens de ambos os métodos também foram extraídos do modelo Capgemini. Definiu-se os atributos como sendo os pilares que fundamentam a Indústria 4.0, os critérios sendo os grupos que compõe cada um dos pilares e os subcritérios como sendo as tecnologias necessárias para a implementação de cada grupo. Desta forma, assegurou-se a utilização de um modelo já existente na literatura e que já possui credibilidade em grupos de pesquisa voltados para o tema da Indústria 4.0.



**Figura 18 - IDEF0 da modelagem e aplicação do modelo de avaliação**  
 Fonte: Autor, 2017

A seguir será detalhado como a modelagem em cada um dos métodos utilizados foi realizada e de que forma foi feita a conexão entre eles.

### 3.1 MODELAGEM AHP

A utilização do método AHP no *modelo de avaliação* teve como intuito gerar pesos de importância para os atributos, critérios e subcritérios do modelo Capgemini. A necessidade de gerar pesos de importância surgiu após a observação de que, dependendo do setor em que a empresa avaliada atua, o desenvolvimento de alguns pilares (Smart Product, Smart Innovation, Smart Supply Chain e Smart Factory) pode ser priorizado em detrimento de outros por ter maior relevância. Um exemplo disso pode ser retirado de Brezinski & Venâncio (2017) que também fizeram uso do modelo da Capgemini para avaliar empresas através do método AHP.

Em Brezinski & Venâncio (2017), observa-se que a empresa avaliada pelo método AHP não possui desenvolvimento significativo nos grupos pertencentes ao pilar Smart Supply Chain, uma vez que se trata de uma empresa prestadora de serviços de automação industrial. Esta situação se torna relevante ao levar em conta que as empresas prestadoras de serviço de automação não possuem uma cadeia de suprimentos (supply chain) caracterizada por transporte de produtos ou estoque, já que não produzem produtos físicos.

Fica claro que a não existência de uma cadeia de suprimentos prejudica a avaliação da empresa dentro do cenário da Indústria 4.0. Neste caso, seria injusta a avaliação desta empresa atribuindo pesos iguais a todos os atributos (pilares), critérios (grupos que formam os pilares) e subcritérios (tecnologias presentes nos grupos). Conclui-se, portanto, que no cenário de avaliação de empresas prestadoras de serviço de automação, o pilar Smart Supply Chain deve ter um peso menor para evitar prejuízos na avaliação.

Tendo em mente que esta situação se expande para todas as outras diversas áreas em que uma empresa pode atuar, decidiu-se criar um modelo AHP que reproduzisse o modelo da Capgemini e que pudesse posteriormente ser submetido a avaliação por um especialista do setor automobilístico para o cálculo dos pesos de importância que cada atributo, critério e subcritério tem quando os conceitos de Indústria 4.0 estão sendo avaliados sob a ótica do setor automobilístico. O cálculo dos

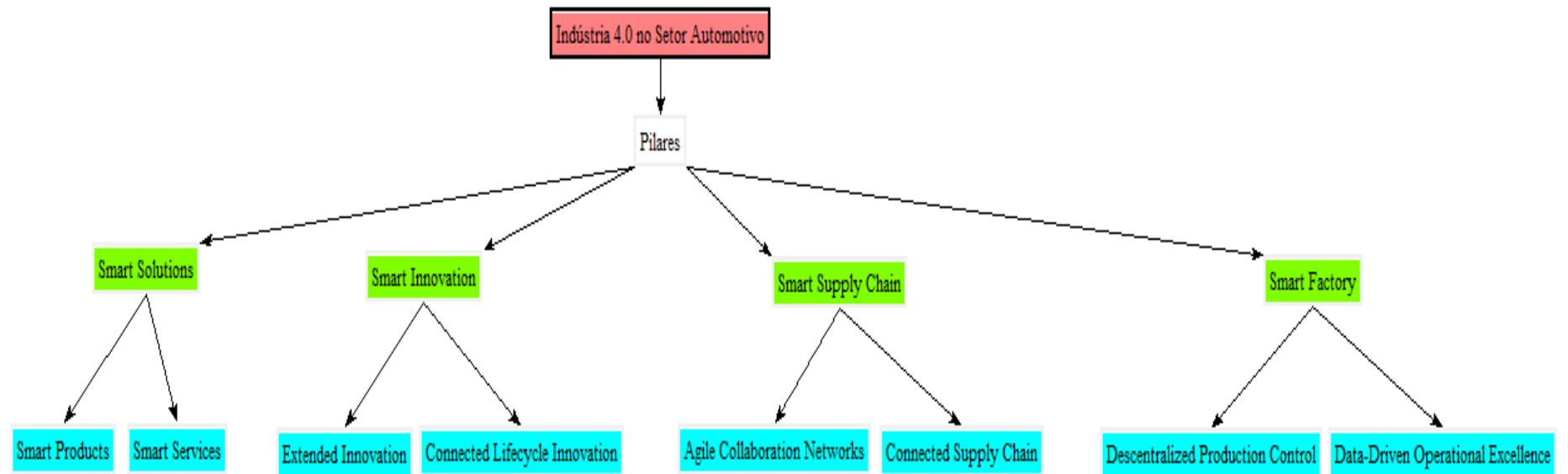
pesos de importância é possível porque o método AHP realiza uma comparação paritária entre todos os atributos, critérios e subcritérios, gerando ao final uma tabela com o peso de importância de cada um deles com referência ao grupo analisado, como pode ser observado na figura 19 a seguir.

| 3. Results             |         |
|------------------------|---------|
| Normal                 | Hybrid  |
| Inconsistency: 0.07759 |         |
| 1.1 Mobile             | 0.30938 |
| 1.2 Cloud              | 0.12097 |
| 1.3 M2M                | 0.33998 |
| 1.4 Analy~             | 0.22967 |

**Figura 19 - Pesos de importância relativos e fator de inconsistência (0.07759).**  
**Fonte: Autor, 2017.**

A modelagem do método AHP foi realizada em conformidade com as instruções desenvolvidas por Saaty. Para facilitar a modelagem do método AHP e calcular seus resultados de forma mais rápida contou-se com a ajuda do software SuperDecisions. Este software foi desenvolvido pela equipe do criador do método AHP, Thomas Saaty, e é disponibilizado de forma gratuita no site dos desenvolvedores (<https://superdecisions.com/about/>).

Como visto na seção anterior, para montar o modelo AHP deve-se definir o objetivo a ser alcançado, os critérios e as alternativas existentes para se alcançar o objetivo. No entanto, como a utilização do método AHP neste trabalho serviu apenas para que se retirassem pesos de importância, não foi necessário definir o objetivo e nem as alternativas no modelo criado. Na figura 20 é possível ver resumidamente o modelo criado para o AHP. Como o método AHP foi utilizado como uma ferramenta auxiliadora para se decidir os graus de importância dos atributos, critérios e subcritérios que fundamentam a Indústria 4.0, o modelo deixou de ter *objetivo* e *alternativas* para se ter uma árvore detalhada dos atributos, critérios e subcritérios da Indústria 4.0.

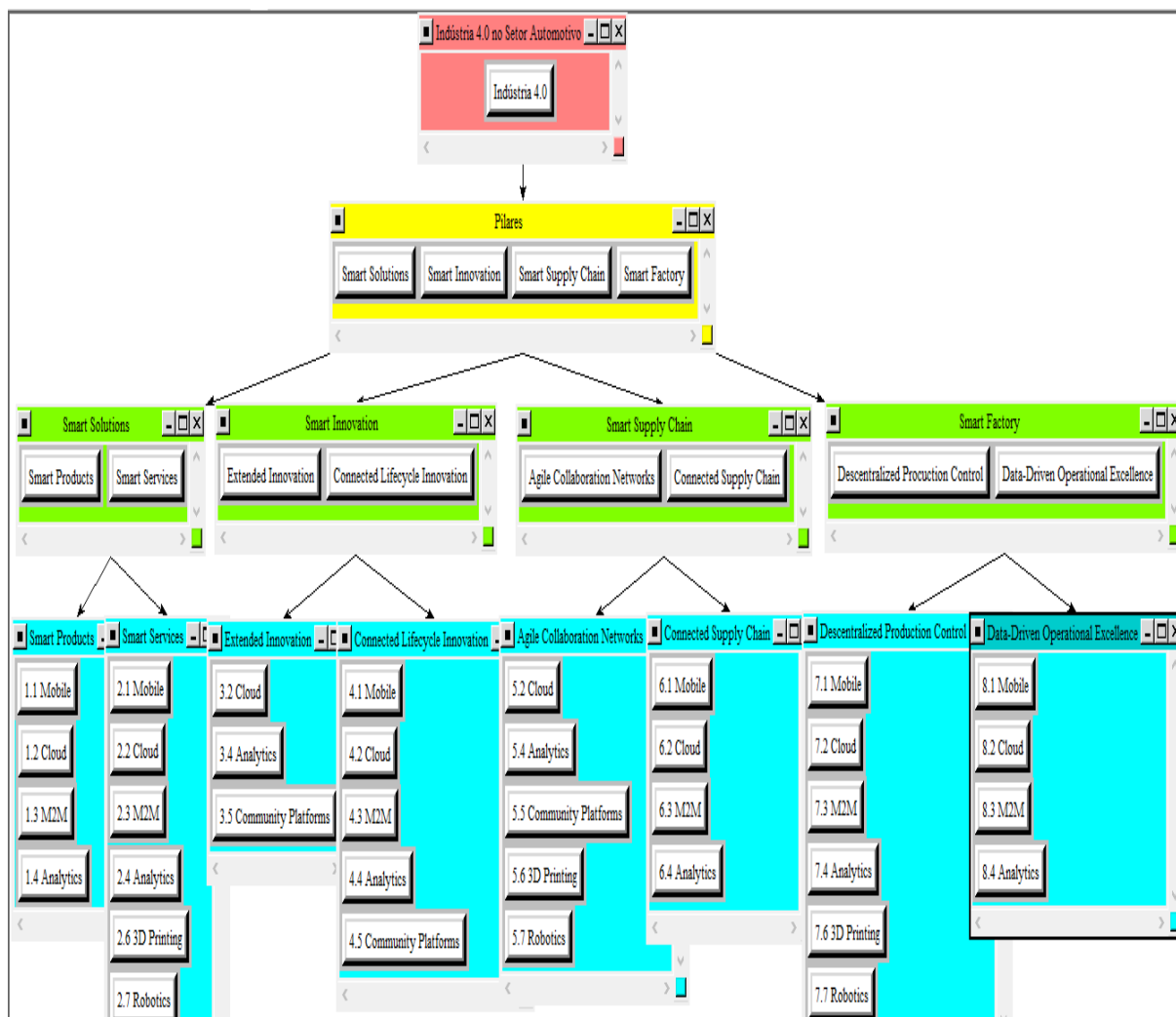


**Figura 20 - Modelo AHP resumido no SuperDecisions.  
Fonte: Autor, 2017.**

Na figura 19, deu-se o nome “*Indústria 4.0 no Setor Automotivo*” ao topo da árvore (em rosa). Em seguida estabeleceu-se os atributos para avaliação. Para isto, definiu-se os atributos dentro de um único cluster, chamado “*Pilares*” (em branco), sendo eles “*Smart Solutions*”, “*Smart Innovation*”, “*Smart Supply Chain*” e “*Smart Factory*”. Como cada pilar principal se subdividia em outros dois, foi criada uma camada de critérios (em verde) dividida em 4 clusters, sendo cada cluster nomeado segundo os pilares e contendo 2 critérios dentro, sendo eles “*Smart Product & Smart Services*” (dentro de Smart Solutions), “*Extended Innovation & Connected Lifecycle Innovation*” (dentro de Smart Innovations), “*Agile Collaboration Networks & Connected Supply Chain*” (dentro de Smart Supply Chains) e “*Decentralized Production Control & Data-driven Operational Excellence*” (dentro de Smart Factory). O modelo de indústria 4.0 feito pela Capgemini também prevê os Technology Enablers essenciais para a implementação de cada um dos critérios (figura 21).

Deste modo, foi inserido uma camada de subcritérios (em azul) no modelo AHP constituído de 8 clusters, onde cada cluster foi nomeado segundo os critérios da camada anterior e contém seus respectivos Technology Enablers. Na figura 21 é possível observar a estrutura hierárquica expandida construída a partir dos atributos, dos critérios e subcritérios.



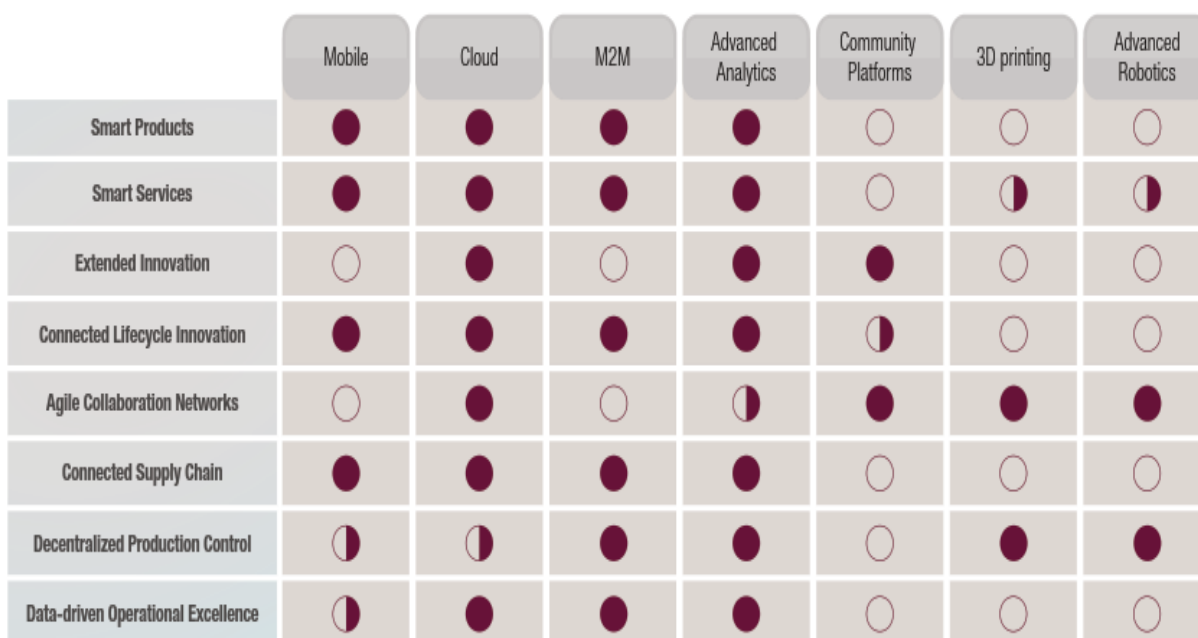


**Figura 21 - Modelo AHP expandido.**<sup>3</sup>  
**Fonte: Autor, 2017.**

A figura 22 a seguir mostra a importância de cada Technology Enabler para a implementação dos grupos e pilares da Indústria 4.0. As circunferências cheias mostram forte relevância do Technology Enabler dentro do grupo conceitual a que se refere, as circunferências vazias mostram fraca relevância do Technology Enabler, portanto desprezível para a implementação do grupo a que se refere, e as circunferências cheias pela metade representam relevância intermediária e, portanto,

<sup>3</sup> Em rosa, no topo da árvore, encontra-se a proposta do modelo (Indústria 4.0 no setor automotivo); na camada mais abaixo, em amarelo, foram definidos os pilares (da esquerda para a direita: Smart Solutions, Smart Innovation, Smart Supply Chain e Smart Factory). Na terceira camada, em verde, foram definidos os grupos de cada pilar (da esquerda para a direita: Smart Products & Smart Services, Extended Innovation & Connected Lifecycle Innovation, Agile Collaboration Networks & Connected Supply Chain e Decentralized Production Control & Data-Driven Operational Excellence); e por último, em azul, encontram-se os Technology Enablers existentes em cada grupo.

também devem ser consideradas na construção dos modelos AHP e PROMETHEE. Vale ressaltar que este julgamento foi considerado apenas para selecionar quais Technology Enablers estariam presentes em cada grupo e que o nível de relevância adotado pela Capgemini não foi levado em consideração no modelo AHP criado, já que eles representam o peso de importância dos Technology Enablers para empresas atuantes em qualquer área. Este método de julgamento adotado pela Capgemini foi refutado neste trabalho por considerar que não reflete o cenário do mundo real, onde empresas de diferentes áreas atribuem pesos de importância diferentes aos Technology Enablers.



**Figura 22 – Figura mostrando a importância de cada Technology Enabler (colunas) em cada um dos oito grupos conceituais da Indústria 4.0 (linhas).**

Fonte: Bechtold et al., 2014

### 3.2 MODELAGEM PROMETHEE

Como previsto anteriormente, o *modelo de avaliação* criado fez uso do método PROMETHEE para ranquear diferentes empresas de um mesmo setor quanto a sua infraestrutura tecnológica e organizacional sob a perspectiva dos conceitos de Indústria 4.0 propostos pela Capgemini. A escolha do método PROMETHEE levou em consideração a forma como as alternativas são ranqueadas e as diversas ferramentas analíticas oferecidas que otimizam a análise dos resultados obtidos. O ranqueamento

é realizado através do cálculo das distâncias euclidianas de cada alternativa até as soluções ideais positiva e negativa. A alternativa analisada que estiver mais próxima da solução ideal positiva e mais longe da solução ideal negativa ocupará a primeira posição no ranking. Um outro fator importante para a escolha deste método foi o fato do PROMETHEE permitir a utilização de pesos entre os critérios para a avaliação das alternativas, algo que se mostrou primordial durante a formulação do *modelo de avaliação* como discutido anteriormente.

A modelagem do método PROMETHEE também foi realizada com ajuda computacional. Para tanto, foi empregado o software Visual PROMETHEE desenvolvido por Bertrand Mareschal em conjunto com o criador do método, Jean-Pierre Brans. Com 30 anos de mercado já, o software possui uma licença gratuita para testes que pode ser baixada diretamente do site dos desenvolvedores (<http://www.promethee-gaia.net>).

O modelo PROMETHEE exige que sejam definidos os critérios de avaliação e as alternativas que serão avaliadas conforme os critérios. Para a estruturação deste modelo, utilizou-se como alternativas empresas concorrentes do setor automobilístico atuantes na região metropolitana de Curitiba e como critérios todos os Technology Enablers referentes aos grupos conceituais do modelo de Indústria 4.0 da Capgemini. Como o modelo PROMETHEE também permite trabalhar com pesos para os critérios, para cada Technology Enabler foi estabelecido seu respectivo peso de importância absoluto, gerado através dos dados do modelo AHP. Além dos critérios, das alternativas e dos pesos, também foi necessário definir as funções de preferência de cada critério.

Durante a execução da avaliação do PROMETHEE, entendeu-se que a preferência entre as alternativas varia proporcionalmente com a diferença entre as notas de cada alternativa quando avaliada sob a perspectiva de um único critério. Isto significa dizer que apesar de sempre se preferir a alternativa com maior nota, o grau de preferência aumenta de acordo com a diferença entre as notas das alternativas. Sendo assim, a função de preferência escolhida foi a Função Tipo 3 V-Shape (figura 24) e o valor “p” de preferência variou para cada critério. Para o cálculo do valor de preferência “p”, optou-se por utilizar as sugestões que o próprio software Visual PROMETHEE faz ao usuário.

### iii) Função Tipo 3 (V-Shape Criterion)

Nesta função " $p$ " é o limiar de preferência estrita. Quando a diferença entre as alternativas é superior a este limiar, há preferência estrita pela alternativa " $a$ ". Quando a diferença é menor que " $p$ " a preferência aumenta de forma linear em razão da diferença entre as alternativas.

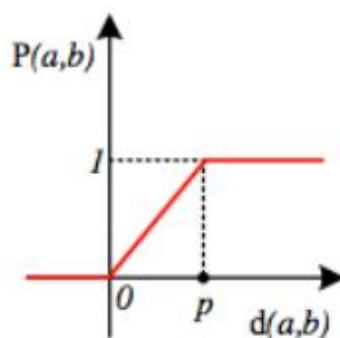


Figura 23 - Função V-Shape de Preferência para o Método PROMETHEE. <sup>4</sup>  
Fonte: Grupo IAAS – PUC.

A figura 25 mostra parte do modelo construído no software Visual PROMETHEE. Vale notar que uma terceira empresa foi adicionada ao modelo com o intuito de explorar melhor a capacidade de avaliação do modelo criado. Por não se tratar de uma empresa real, as notas de avaliação também não são reais; por este motivo a empresa recebeu o nome de Empresa Fictícia. A inserção de uma terceira empresa não real ao modelo além de não prejudicar a avaliação, também explicita o uso do *modelo de avaliação* para possíveis cenários desejados.

<sup>4</sup> O valor  $P(a,b)$  representa o grau de preferência da alternativa " $a$ " com relação a " $b$ ". O valor  $d(a,b)$  representa a diferença entre as notas das alternativas e o valor " $p$ " indica a distância em que " $a$ " passa a ser totalmente preferível a " $b$ ".

Visual PROMETHEE Academic - Modelo Ind 4 v8.vpg (saved)

File Edit Model Control PROMETHEE-GAIA GDSS GIS Custom Assistants Snapshots Options Help

|  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Paraná</b>  | 1.1 Mobile                          | 1.2 Cloud                           | 1.3 M2M                             | 1.4 Analytics                       | 2.1 Mobile                          | 3.5 Communi...                      |                                     |
| Unit   | unit                                | unit                                | unit                                | unit                                | unit                                | unit                                | unit                                |
| Cluster/Group  | ■                                   | ■                                   | ■                                   | ■                                   | ■                                   | ■                                   | ■                                   |
| <b>Preferences</b>                                   |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |
| Min/Max  | max                                 | max                                 | max                                 | max                                 | max                                 | max                                 | max                                 |
| Weight   | 0.11                                | 0.04                                | 0.12                                | 0.08                                | 0.03                                | 0.10                                |                                     |
| Preference Fn.                                       | V-shape                             | V-shape                             | V-shape                             | V-shape                             | V-shape                             | V-shape                             | V-shape                             |
| Thresholds   | absolute                            | absolute                            | absolute                            | absolute                            | absolute                            | absolute                            | absolute                            |
| - Q: Indifference                                    | n/a                                 | n/a                                 | n/a                                 | n/a                                 | n/a                                 | n/a                                 | n/a                                 |
| - P: Preference                                      | 2.28                                | 3.41                                | 4.58                                | 3.91                                | 2.82                                | 1.14                                |                                     |
| - S: Gaussian  | n/a                                 | n/a                                 | n/a                                 | n/a                                 | n/a                                 | n/a                                 | n/a                                 |
| <b>Statistics</b>                                    |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |
| Minimum  | 3.00                                | 1.00                                | 3.00                                | 3.00                                | 3.00                                | 3.00                                |                                     |
| Maximum  | 5.00                                | 4.00                                | 8.00                                | 7.00                                | 6.00                                | 4.00                                |                                     |
| Average  | 3.67                                | 3.00                                | 5.67                                | 5.33                                | 4.67                                | 3.67                                |                                     |
| Standard Dev.  | 0.94                                | 1.41                                | 2.05                                | 1.70                                | 1.25                                | 0.47                                |                                     |
| <b>Evaluations</b>                                   |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |                                     |
| <input checked="" type="checkbox"/> Empresa R        | ■                                   | 3.00                                | 1.00                                | 3.00                                | 3.00                                | 5.00                                | 3.00                                |
| <input checked="" type="checkbox"/> Empresa V        | ■                                   | 3.00                                | 4.00                                | 8.00                                | 6.00                                | 6.00                                | 4.00                                |
| <input checked="" type="checkbox"/> Empresa Fictícia | ■                                   | 5.00                                | 4.00                                | 6.00                                | 7.00                                | 3.00                                | 4.00                                |

Figura 24 – Figura retirada do software Visual PROMETHEE representando o modelo PROMETHEE criado.<sup>5</sup>  
Fonte: Autor, 2017.

<sup>5</sup> Os critérios encontram-se nas colunas e as alternativas (Empresa R, Empresa V e Empresa Fictícia) encontram-se nas últimas três linhas da figura. Os valores em frente aos nomes das empresas representam o nível de desenvolvimento do critério avaliado (Technology Enabler) na empresa correspondente. Os critérios foram numerados conforme sua posição no modelo completo da Capgemini: 1.1 Mobile representa que o critério Mobile é o primeiro Technology Enabler avaliado e faz parte do grupo 1 (Smart Products); a numeração dos critérios segue a lógica adotada na tabela 2. O peso de importância absoluta de cada critério encontra-se preenchido na linha *Weight*.

## 4 APLICAÇÃO DO MODELO DE AVALIAÇÃO E RESULTADOS

### 4.1 APLICAÇÃO DO MODELO AHP

Após estruturado o AHP no software SuperDecisions, o modelo foi submetido a avaliação por um especialista da área do setor automobilístico. Nesta etapa, houve a preocupação de selecionar um especialista com amplo conhecimento no setor para que a avaliação se aproximasse do cenário real. A fim de se obter mais assertividade dos resultados, limitou-se o setor avaliado pela região geográfica em estudo. Sendo assim, o avaliador levou em consideração apenas seu conhecimento no setor automobilístico da região metropolitana de Curitiba, no estado do Paraná.

Como proposto pelo método AHP, para se definir os pesos de importância de cada elemento do modelo estruturado foi realizada uma comparação par a par entre os atributos, critérios e subcritérios. Para tal, a escala de 1 a 9 sugerida por Saaty (mostrada anteriormente na tabela 1) foi aplicada dentro do software SuperDecisions. O especialista teve então que responder cluster a cluster, o quanto um atributo, critério ou subcritério era mais importante que um outro atributo, critério ou subcritério do mesmo cluster até que todos os elementos tivessem sido comparados paritariamente.

A figura 23 mostra uma janela do programa SuperDecisions onde é possível ver a comparação par a par de alguns atributos realizada pelo especialista em um único cluster; no canto direito da imagem também pode-se observar os pesos atribuídos pelo AHP a cada um dos atributos avaliados e que representam a importância daquele atributo, dentro do cluster analisado, para a implementação da Indústria 4.0 no setor automobilístico.

Comparisons for Super Decisions Main Window: industria 4 v2.sdmod

**1. Choose**

Node Cluster

Choose Node

Indústria 4.0

Cluster: Indústria 4.0 n~

Choose Cluster

Pilares

Restore

**2. Node comparisons with respect to Indústria 4.0**

Graphical Verbal Matrix Questionnaire Direct

Comparisons wrt "Indústria 4.0" node in "Pilares" cluster

Smart Innovation is moderately more important than Smart Factory

|                     |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |       |          |                  |
|---------------------|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-------|----------|------------------|
| 1. Smart Factory    | >=9.5 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | >=9.5 | No comp. | Smart Innovatio~ |
| 2. Smart Factory    | >=9.5 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | >=9.5 | No comp. | Smart Solutions  |
| 3. Smart Factory    | >=9.5 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | >=9.5 | No comp. | Smart Supply Ch~ |
| 4. Smart Innovatio~ | >=9.5 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | >=9.5 | No comp. | Smart Solutions  |
| 5. Smart Innovatio~ | >=9.5 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | >=9.5 | No comp. | Smart Supply Ch~ |
| 6. Smart Solutions  | >=9.5 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | >=9.5 | No comp. | Smart Supply Ch~ |

**3. Results**

Normal Hybrid

Inconsistency: 0.04417

|            |         |
|------------|---------|
| Smart Fac~ | 0.14793 |
| Smart Inn~ | 0.28450 |
| Smart Sol~ | 0.46124 |
| Smart Sup~ | 0.10633 |

Completed Comparison

Copy to clipboard

**Figura 25 – Comparação paritária retirado do software SuperDecisions. <sup>6</sup>**  
**Fonte: Autor, 2017.**

#### 4.1.1 Resultados do AHP

Uma vez que o especialista concluiu a avaliação do setor automobilístico com enfoque na implementação da Indústria 4.0, o resultado gerado pelo AHP foram os pesos de importância de cada atributo, critério e subcritério da Indústria 4.0. Na tabela 2 a seguir é possível ver todos os pesos gerados pelo AHP ordenados conforme o modelo da Capgemini. Vale ressaltar que o AHP fornece os pesos de importância em comparação com os elementos que estão sendo avaliados dentro de um mesmo cluster, assim, para cada cluster avaliado, a soma dos pesos de importância de seus elementos sempre resulta em 1 (100%).

Levando-se em consideração o *modelo de avaliação* criado neste trabalho, somente os pesos de importância dos subcritérios (Technology Enablers) foram utilizados como entrada no modelo PROMETHEE. No entanto, para encontrar o peso

<sup>6</sup> À esquerda pode-se visualizar o cluster em avaliação (Pilares), no meio temos as escalas de comparações entre os elementos dentro do cluster (Smart Factory, Smart Innovation, Smart Solutions e Smart Supply Chain) e à direita temos os resultados com o peso de importância relativo de cada elemento do cluster e o valor de inconsistência do julgamento (0.04417), que deve ser sempre abaixo de 0.1.

absoluto de importância de cada Technology Enabler dentro do modelo completo foi necessário multiplicar seus pesos relativos pelos demais pesos relativos dos clusters dos níveis acima aos seus. A explicação a seguir esclarece este procedimento

Pela tabela 2 logo abaixo podemos notar que o pilar Smart Solutions recebeu peso 0,46124. Isso significa que este pilar tem aproximadamente 46% de importância para a implementação de uma Indústria 4.0 no setor automotivo do Paraná, quando comparado com os demais pilares. Se somarmos os pesos dos quatro pilares obteremos valor igual a 1. Logo abaixo, notamos que o pilar Smart Solutions foi dividido em seus outros dois grupos, Smart Products e Smart Services. Como os dois grupos foram avaliados dentro do cluster Smart Solutions, a soma de seus pesos também deve ser igual a 1.

Podemos observar que o grupo Smart Products recebeu o maior peso de importância entre os dois, 0,75. Mais abaixo, o modelo se divide em um terceiro nível (subcritérios) composto pelos Technology Enablers considerados fundamentais para a implementação dos grupos a que pertencem. Abaixo dos Smart Products, podemos observar os quatro Technology Enablers presentes neste grupo. Ao analisarmos os valores dos pesos de importância de cada um, podemos concluir que o Technology Enabler mais importante dentro do grupo é o M2M, com peso 0,33998, ou seja, dentre os quatro Technology Enablers presentes no grupo Smart Products, M2M tem aproximadamente 34% de importância para a implementação deste grupo.

Se somarmos os valores dos pesos dos quatro Technology Enablers também obteremos valor igual a 1. Apesar do AHP retornar o valor do peso de importância de cada atributo, critério e subcritério, estes valores são relativos somente ao cluster em análise e não são adequados para serem utilizados como entrada no modelo PROMETHEE, uma vez que no PROMETHEE são necessários os pesos absolutos de cada subcritério, ou seja, os pesos de importância analisados sob a perspectiva do modelo completo.

Portanto, antes de entrar com os valores no modelo PROMETHEE, houve a necessidade de tratar os dados retirados do AHP. Para encontrar o valor absoluto dos pesos de cada subcritério, multiplicou-se o valor do peso relativo do Technology Enabler em questão pelo peso relativo do seu respectivo grupo e posteriormente pelo peso relativo do seu respectivo pilar. Sendo assim, o peso absoluto do Technology Enabler M2M do grupo Smart Products e que está dentro do pilar Smart Solutions é:  $0,33998 * 0,75 * 0,46124 = 0,117609$ . Este valor então é interpretado como sendo o



peso de importância que o M2M do grupo Smart Products tem para a implementação da Indústria 4.0 como um todo no setor automotivo, ou seja, este Technology Enabler tem aproximadamente 12% de importância para a implementação deste modelo de Indústria 4.0 como um todo. A soma dos pesos absolutos de todos os Technology Enablers também é igual a 1. Os valores absolutos de cada subcritério podem ser encontrados na tabela 2 nas linhas numeradas de 21 a 27.

**Tabela 2 – Tabela Excel com todos os pesos de importância dos atributos, critérios e subcritérios retirados do modelo AHP. Fonte: Autor, 2017.**

|    | A             | B  | C              | D                           | E                   | F                              | G               | H                        | I           |
|----|---------------|--|----------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------|-------------|
| 1  |               | Smart Solutions<br>0,46124                                       |                | Smart Innovations<br>0,2845 |                     | Smart Supply Chains<br>0,10633 |                 | Smart Factory<br>0,14793 |             |
| 2  |               |  |                |                             |                     |                                |                 |                          |             |
| 3  |               |  |                |                             |                     |                                |                 |                          |             |
| 4  |               | 1  | 2              | 3                           | 4                   | 5                              | 6               | 7                        | 8           |
| 5  |               | Smart Products   | Smart Services | Extended Innovation         | Connected Lifecycle | Agile Col. Net.                | C. Supply Chain | Decentralized Prod.      | Data-Driven |
| 6  |               | 0,75   | 0,25           | 0,75                        | 0,25                | 0,8                            | 0,2             | 0,33333                  | 0,66667     |
| 7  | 1 Mobile      | 0,30938  | 0,24308        |                             | 0,22067             |                                | 0,32203         | 0,41984                  | 0,20869     |
| 8  |               |  |                |                             |                     |                                |                 |                          |             |
| 9  | 2 Cloud       | 0,12097  | 0,29196        | 0,12601                     | 0,14557             | 0,12058                        | 0,45317         | 0,1427                   | 0,23892     |
| 10 |               |  |                |                             |                     |                                |                 |                          |             |
| 11 | 3 M2M         | 0,33998  | 0,08869        |                             | 0,28606             |                                | 0,10067         | 0,17624                  | 0,25302     |
| 12 |               |  |                |                             |                     |                                |                 |                          |             |
| 13 | 4 Analytics   | 0,22967  | 0,19379        | 0,41606                     | 0,18739             | 0,22031                        | 0,12413         | 0,09683                  | 0,29937     |
| 14 |               |  |                |                             |                     |                                |                 |                          |             |
| 15 | 5 Platforms   |  |                | 0,45793                     | 0,1603              | 0,43206                        |                 |                          |             |
| 16 |               |  |                |                             |                     |                                |                 |                          |             |
| 17 | 6 3D Printing |  | 0,09378        |                             |                     | 0,13083                        |                 | 0,07881                  |             |
| 18 |               |  |                |                             |                     |                                |                 |                          |             |
| 19 | 7 Robotics    |  | 0,08869        |                             |                     | 0,09622                        |                 | 0,08558                  |             |
| 20 |               | PESO ABSOLUTO DOS SUBCRITÉRIOS NA PERSPECTIVA DO MODELO COMPLETO |                |                             |                     |                                |                 |                          |             |
| 21 |               |  |                |                             |                     |                                |                 |                          |             |
| 22 | Mobile        | 0,107023823  | 0,028029555    |                             | 0,015695154         |                                | 0,00684829      | 0,020702103              | 0,020581111 |
| 23 | Cloud         | 0,041847152  | 0,033665908    | 0,026887384                 | 0,010353666         | 0,010257017                    | 0,009637113     | 0,007036467              | 0,023562408 |
| 24 | M2M           | 0,117609281  | 0,010226844    |                             | 0,020346018         |                                | 0,002140848     | 0,008690307              | 0,024952957 |
| 25 | Analytics     | 0,079449743  | 0,022345925    | 0,088776803                 | 0,013328114         | 0,01874045                     | 0,002639749     | 0,00477464               | 0,029524017 |
| 26 | Platforms     |  |                | 0,097710814                 | 0,011401338         | 0,036752752                    |                 |                          |             |
| 27 | 3D Printing   |  | 0,010813772    |                             |                     | 0,011128923                    |                 | 0,003886082              |             |
| 28 | Robotics      |  | 0,010226844    |                             |                     | 0,008184858                    |                 | 0,004219908              |             |

## 4.2 APLICAÇÃO DO MODELO PROMETHEE

O modelo PROMETHEE foi submetido a avaliação por especialistas de duas empresas automobilísticas atuantes na região metropolitana de Curitiba, Paraná. Para isso, os avaliadores tiveram que dar notas aos Technology Enablers presentes nas empresas sobre as quais tinham conhecimento, usando para tal uma escala construída exclusivamente para este propósito de avaliação. A escala foi construída após discussões com o especialista avaliador do método AHP e também com os especialistas avaliadores do método PROMETHEE. Uma vez que o objetivo do

modelo PROMETHEE era determinar o nível de desenvolvimento da empresa avaliada, as notas da escala deveriam representar o estágio de desenvolvimento de cada Technology Enabler dentro da fábrica de acordo com o grupo e pilar a que pertenciam do modelo Capgemini. A tabela 3 traz a escala detalhada de 1 a 9 utilizada pelos especialistas na avaliação.

**Tabela 3 - Escala utilizada para avaliação dos Technology Enablers necessários para implementação da Indústria 4.0 no setor automobilístico. Fonte: Autor, 2017**

|   |  |
|---|--|
| 1 | A tecnologia não está implementada na empresa e nem se tem conhecimento sobre ela  |
| 2 | Existe algum conhecimento sobre a tecnologia   |
| 3 | Existe conhecimento sobre a tecnologia e interesse em investir nela  |
| 4 | Já existe um investimento inicial para o desenvolvimento da tecnologia, seja em grupos de pesquisa ou na compra de dispositivos e serviços |
| 5 | A tecnologia encontra-se em fase de testes dentro da empresa   |
| 6 | A tecnologia já está sendo utilizada dentro da empresa, porém, em fase inicial   |
| 7 | A tecnologia está sendo utilizada dentro da empresa há algum tempo, porém, sem padronização  |
| 8 | A tecnologia está sendo utilizada dentro da empresa de forma padronizada, porém, sem preocupação em melhorá-la                             |
| 9 | A tecnologia avaliada está padronizada e existe investimento para sua constante melhoria   |

Sendo assim, cada avaliador foi então questionado sobre o nível em que cada Technology Enabler se encontrava dentro da empresa de acordo com a escala de 1 a 9. Na figura 25, onde está escrito *Evaluation*, é possível observar algumas das notas dadas pelos especialistas a alguns dos critérios analisados. A partir destas notas, o Visual PROMETHEE calculou as distâncias euclidianas de cada Technology Enabler

nos cenários das duas fábricas até as soluções ideal positiva e negativa e comparou com o cenário de cada uma das empresas avaliadas.

#### 4.2.1 Resultados do PROMETHEE

Os resultados encontrados forneceram dados da competitividade entre as empresas atuantes no setor automobilístico da região do Paraná. A análise levou em conta o desenvolvimento das tecnologias fundamentais para a instalação da Indústria 4.0 no setor, como também o peso de cada tecnologia segundo a visão de profissionais e especialistas da área. No entanto, a análise dos resultados não se limita a apenas isso. A seguir serão apresentados alguns dos métodos de análise gerados pelo software que possibilitam uma análise mais complexa do cenário avaliado.

- PROMETHEE I

Neste método de análise calcula-se os fluxos positivos e negativos das alternativas,  $\phi(a)^+$  e  $\phi(a)^-$ , para poder compará-las. Isto é realizado pelo software de forma gráfica. No estudo de caso avaliado o gráfico gerado encontra-se na figura 26 a seguir. Na barra mais à esquerda encontra-se o fluxo positivo, quanto maior o valor de  $\phi(a)^+$  mais a alternativa se aproxima da solução ideal positiva e, portanto, melhor a alternativa. Na barra mais à direita, temos o fluxo negativo, quanto maior o valor de  $\phi(a)^-$  mais a alternativa se aproxima da solução ideal negativa e, portanto, pior a alternativa – é importante notar que na barra mais à direita os valores maiores se encontram na parte inferior da barra. Desta forma, a melhor alternativa ranqueada pelo método será aquela que se aproxima mais da solução ideal positiva e se afasta mais da solução ideal negativa. Cada uma das retas no gráfico ligam os valores dos fluxos positivos e negativos para uma alternativa. Quando duas retas se cruzam, podemos afirmar que a escolha pela melhor alternativa se torna mais complexa, pois o método não permite determinar qual entre as retas que se cruzam estaria melhor ranqueada, ficando a cargo do próprio avaliador tomar esta decisão. A figura 26 a seguir mostra o método de análise PROMETHEE I para o estudo de caso apresentado. É possível ver que a Empresa R e a Empresa Fictícia cruzam suas retas

e, portanto, possuem alta complexidade de análise que dificulta a decisão entre elas de qual a melhor alternativa. A Empresa V se destaca como sendo a melhor.

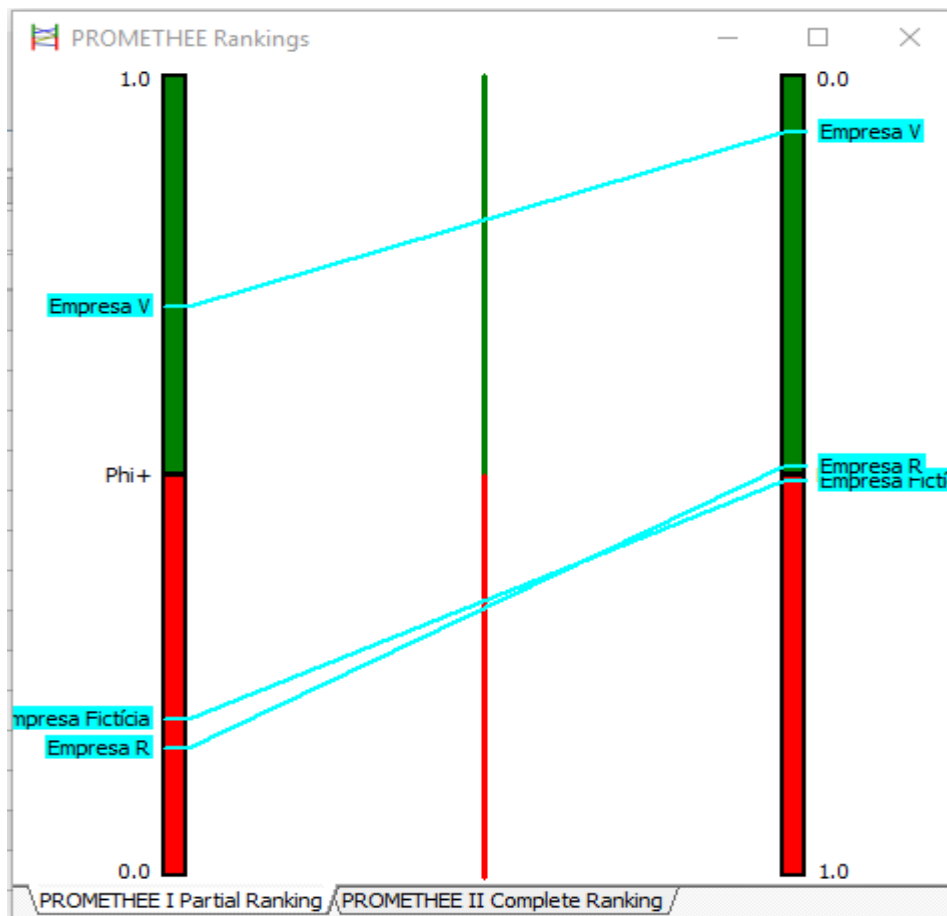
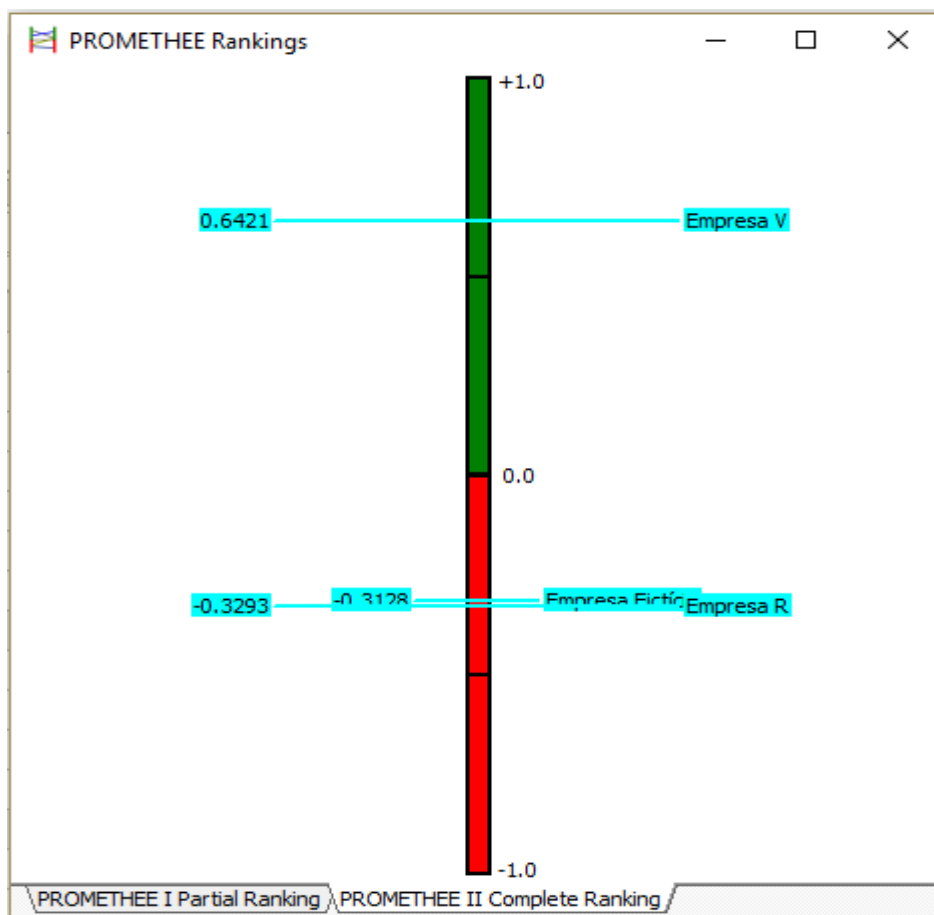


Figura 26 - Método de Análise PROMETHEE I.  
Fonte: Autor, 2017.

- PROMETHEE II

A dificuldade em se decidir o ranqueamento das empresas analisadas pode ser contornada quando fazemos uso do método de análise PROMETHEE II. Neste método, devemos avaliar somente o fluxo de rede  $\phi(a)$  que é dado pela diferença entre os fluxos positivo e negativo,  $\phi(a) = \phi(a)^+ - \phi(a)^-$ . Deste modo, a melhor alternativa será aquela que possuir o maior fluxo de rede e as outras alternativas são ranqueadas em ordem decrescente. A figura 27 a seguir mostra o gráfico do PROMETHEE II para o estudo de caso apresentado. Podemos observar que a melhor alternativa é a Empresa V com fluxo de rede igual a 0,6421. Em segundo lugar está a Empresa Fictícia com fluxo de rede igual a -0,3128 e em terceiro a Empresa R com fluxo de rede igual a -0,3293.



**Figura 27 – Método de Análise PROMETHEE II**  
 Fonte: Autor, 2017.

Os valores dos fluxos de rede e dos fluxos positivo e negativo das três alternativas encontram-se na figura 28 a seguir.

| Rank | action           | Phi     | Phi+   | Phi-   |
|------|------------------|---------|--------|--------|
| 1    | Empresa V        | 0.6421  | 0.7115 | 0.0694 |
| 2    | Empresa Fictícia | -0.3128 | 0.1951 | 0.5079 |
| 3    | Empresa R        | -0.3293 | 0.1583 | 0.4876 |

**Figura 28 - Fluxos de rede e fluxos positivo e negativo.**  
 Fonte: Autor, 2017.

- Fluxo de Preferência por Critério

Este gráfico permite a visualização do fluxo de preferência de cada um dos critérios avaliados. Na figura 29 podemos observar o gráfico de fluxo de preferência por critério do estudo de caso apresentado. Os critérios podem ser identificados pela numeração e estão numerados de acordo com a tabela 2 apresentada anteriormente. As cores das barras indicam o pilar correspondente do critério em análise e as cores do contorno indicam o grupo a que corresponde o critério em análise. Por exemplo, as quatro primeiras barras do gráfico estão na cor azul marinho e contornados por um azul mais claro: assim, estes quatro critérios fazem parte do mesmo pilar (Smart Solutions) e do mesmo grupo (Smart Products). A quinta barra está representada também na cor azul marinho, porém com contorno em vermelho: isto indica que este critério faz parte do mesmo pilar que os anteriores, porém de um grupo diferente (Smart Services). A altura das barras mostra o fluxo de preferência de cada critério. As barras para cima indicam fluxo positivo, enquanto as barras para baixo indicam fluxo negativo. A barra cinza por todo o gráfico mostra o fluxo de preferência de rede (PROMETHEE II) da empresa em análise. Este método de análise é uma importante ferramenta para avaliar quais critérios estão levando a empresa para um cenário favorável e quais para um cenário desfavorável do que se deseja alcançar. Com isto, se torna mais claro em quais critérios o gestor deve investir mais de modo a levar a empresa para um cenário mais próximo do ideal de Indústria 4.0. No entanto, deve-se sempre ter em mente que o investimento deve ser direcionado preferencialmente aos critérios que possuam maior peso e que ainda não estejam contribuindo para um cenário favorável. Assim, existe a garantia de que os investimentos impulsionarão a empresa a um patamar melhor de forma mais rápida do que se os investimentos estivessem sido direcionados a critérios com pesos pequenos.

- Análise por Peso

Por último, na análise por peso dá-se preferência gráfica aos pesos dos critérios. Também é possível que o usuário interaja com o gráfico mudando os pesos de um dado critério e observando o comportamento das empresas em análise. Na figura 30 podemos observar o gráfico dos pesos de cada critério e a situação de cada empresa quando analisada sob a perspectiva do critério em análise.

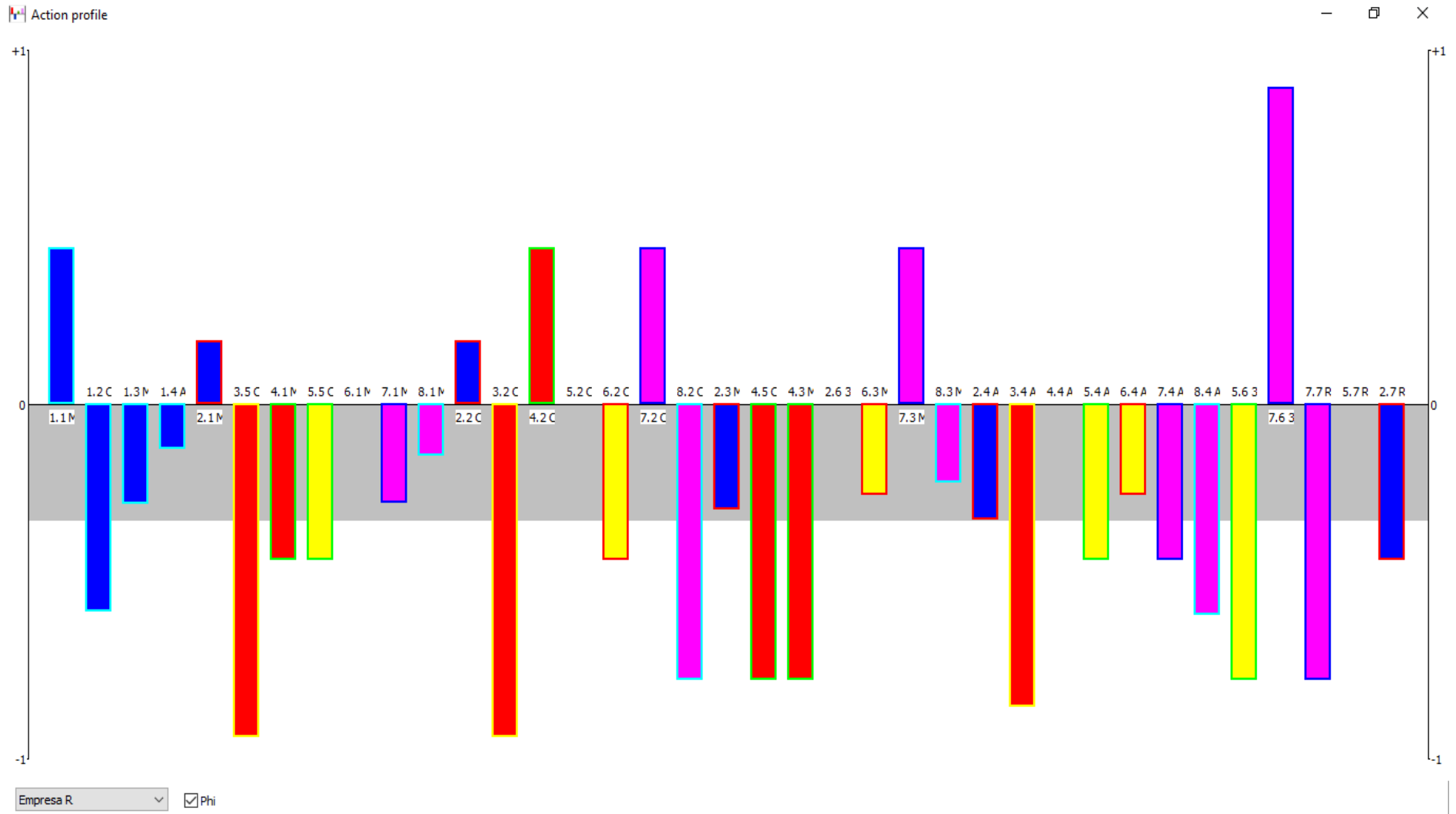


Figura 29 - Gráfico com os fluxos de preferência por critério.  
 Fonte: Autor, 2017.

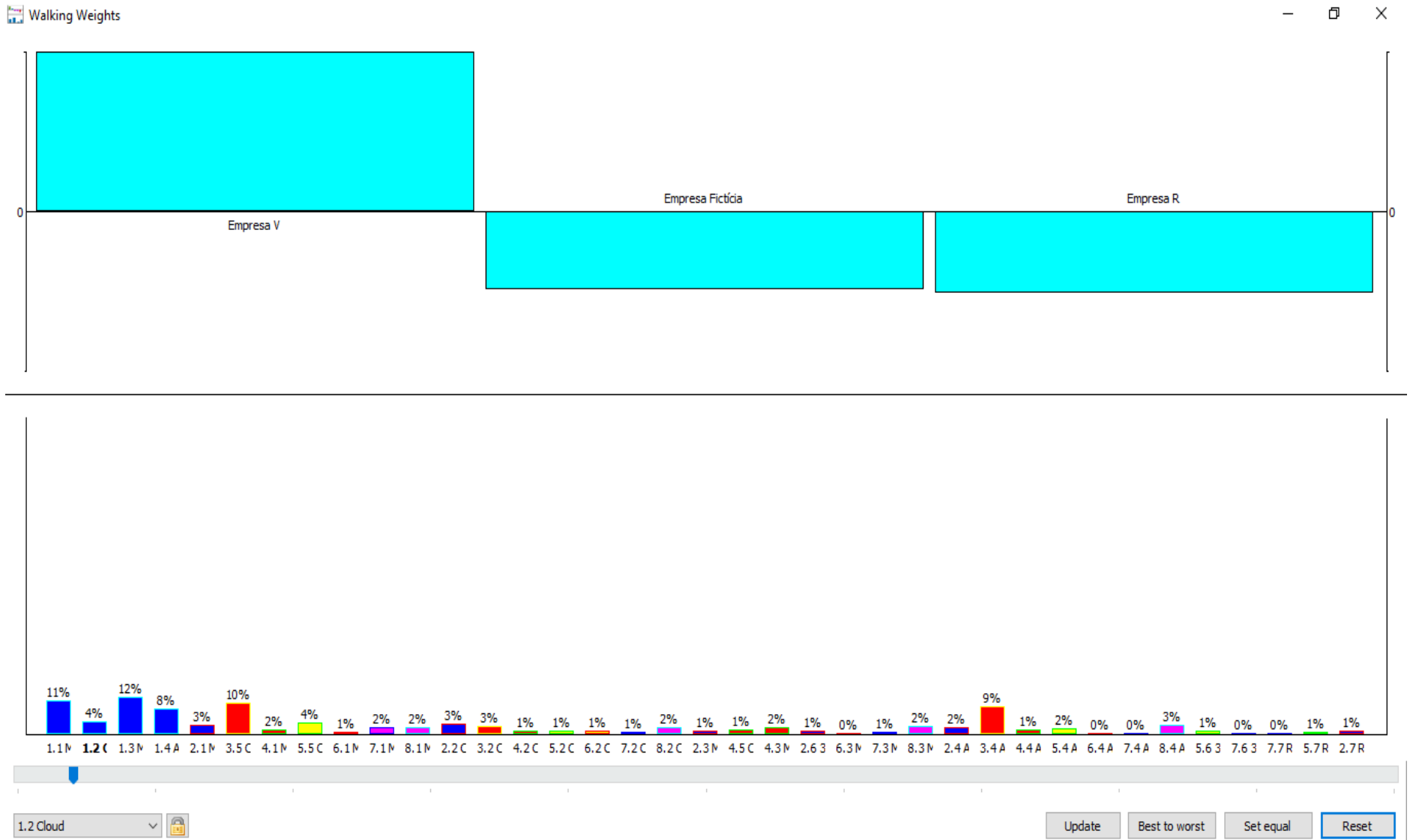


Figura 30 - Gráfico dos pesos de cada critério.  
 Fonte: Autor, 2017.



Tendo em mãos os gráficos da situação atual da empresa, um gestor pode priorizar com mais clareza as ações voltadas para o desenvolvimento de tecnologias que pesem mais na implementação do conceito de Indústria 4.0 e que no estado atual apresentam-se pouco desenvolvidas ou até mesmo ainda inexistentes dentro da empresa. Com esta atitude, aumenta-se a chance da empresa se manter competitiva dentro do mercado regional.

Sabendo do saldo disponível para investimentos e do tempo necessário para retorno, ao invés de se incluir as notas atuais da empresa, o gestor pode ainda inserir notas de possíveis cenários que se deseja alcançar para a empresa em um intervalo de tempo conhecido. Dessa maneira, os diversos métodos de análise do PROMETHEE proporcionam uma visão melhor do futuro desejado e possibilitam investigar em quais cenários os investimentos trarão maior benefício para a empresa.

Entende-se que esta variedade de interpretações torna este *modelo de avaliação* em uma ferramenta de análise capaz de auxiliar empresários e gestores na decisão do direcionamento dos investimentos, de forma que obtenham resultados mais satisfatórios ao tentar incluir suas empresas dentro do modelo ideal de Indústria 4.0.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por finalidade o desenvolvimento de uma ferramenta organizacional que fornecesse uma visão mais detalhada do atual estado tecnológico de uma empresa, comparando-a com o que viria a ser o ideal de uma Indústria 4.0. Para conceituar o ideal de Indústria 4.0, uma vasta pesquisa em material científico publicado foi realizada.

Após determinar os conceitos fundamentais que mais apareceram nas publicações consultadas, realizou-se uma busca por um referencial já existente que melhor englobasse esses conceitos. Após vários frameworks estudados, optou-se por utilizar como referência o modelo proposto pela empresa de consultoria Capgemini.

A análise do estado tecnológico atual de uma empresa é importante para que gestores possam tomar decisões mais assertivas quanto ao direcionamento dos investimentos de suas empresas a fim de garantir a competitividade de seus produtos e serviços dentro do mercado em que atuam. Durante a elaboração do trabalho, constatou-se que apesar dos conceitos da Indústria 4.0 se aplicarem, em geral, a todas as indústrias, o peso de importância que alguns conceitos têm para o desenvolvimento da Indústria 4.0 difere quanto ao ramo em que a empresa atua.

Sendo assim, foi necessário criar um *modelo de avaliação* que empregou dois métodos multicritérios de apoio a decisão: AHP e PROMETHEE. O primeiro método foi empregado justamente para calcular os pesos de importância relacionados ao desenvolvimento da indústria automobilística, enquanto o segundo foi empregado para ranquear empresas do setor de acordo com a proximidade que se encontravam do ideal de Indústria 4.0.

Como os especialistas avaliadores possuíam conhecimento mais profundo sobre a realidade do setor automobilístico paranaense, decidiu-se por limitar o estudo à região metropolitana da cidade de Curitiba, no estado do Paraná. No estudo de caso, devido à limitação de tempo, um único especialista do setor automobilístico avaliou o método AHP. Este processo gerou como resultado pesos de importância para os pilares, grupos e Technology Enablers do modelo de Indústria 4.0 utilizado como base neste trabalho. Na etapa seguinte, estes pesos de importância foram incorporados ao

método PROMETHEE e dois profissionais de grandes empresas do setor automobilístico foram consultados para avaliar suas empresas.

A avaliação deles gerou notas de desenvolvimento referentes aos Technology Enablers e estas notas foram introduzidas no PROMETHEE para análise. Uma terceira empresa fictícia foi inserida na avaliação para tornar a análise mais complexa e colocar em evidência o poder de análise do *modelo de avaliação* criado. Como esperado, o método PROMETHEE ranqueou as empresas avaliadas após o cálculo das distâncias euclidianas entre as notas das empresas e as situações ideais positiva e negativa. Ao fim, o *modelo de avaliação* agiu como o esperado, ranqueando as empresas de acordo com o grau de desenvolvimento tecnológico de suas plantas quando observadas sob a ótica da Indústria 4.0.

Sendo assim, conclui-se que os resultados obtidos vão de acordo com o objetivo geral deste trabalho, o de avaliar diferentes métodos multicritérios de apoio a decisão, no caso AHP e PROMETHEE, para análise do potencial que uma organização apresenta para atender aos requisitos preconizados pela Indústria 4.0 e diagnosticar as diferentes barreiras para evolução das capacidades da organização em direção ao conceito de Indústria 4.0.

## 5.2 POSSÍVEIS CENÁRIOS DE AVALIAÇÃO

É importante falar que o cenário avaliado pelo *modelo de avaliação* não se limita ao que foi utilizado no estudo de caso averiguado neste trabalho. É possível fazer outras análises modificando os critérios avaliados. Optou-se por utilizar os Technology Enablers como critérios no *modelo de avaliação* por estes apresentarem uma visão mais micro da atual situação tecnológica da empresa. No entanto, poderiam ter sido escolhidos os grupos ou até mesmo os pilares do modelo de Indústria 4.0 proposto pela Capgemini. Sendo assim, o *modelo de avaliação* proporcionaria uma visão mais macro da atual situação da empresa, dando mais liberdade aos gestores para decidirem quais tecnologias fazem parte dos grupos e pilares analisados de acordo com seus próprios conhecimentos sobre a empresa.

Do mesmo modo, o *modelo de avaliação* criado neste trabalho também não se limita somente ao setor automobilístico. No entanto, para adequá-lo a outros setores é necessário que se realize primeiramente uma investigação dos pesos de

importância dos pilares, grupos e Technology Enablers do setor em questão através da avaliação do AHP por especialistas da área. Uma vez realizada a ponderação dos pesos, o *modelo de avaliação* se torna novamente uma eficiente ferramenta de análise e pode ser utilizado como auxílio na hora de se determinar o direcionamento dos investimentos de uma empresa.

### 5.3 DIFICULDADES E DESAFIOS FUTUROS

Apesar dos resultados encontrados estarem de acordo com o esperado, existem algumas sugestões para a melhoria do *modelo de avaliação*, principalmente se utilizado dentro de ambientes gerenciais onde exige-se o menor erro possível das ferramentas analíticas.

Primeiramente, o *modelo de avaliação* criado se baseou em um modelo de Indústria 4.0 já existente na literatura, o da Capgemini. Mesmo este modelo tendo sido considerado o mais completo dentre os que foram estudados pelo autor deste trabalho, ainda assim nota-se que alguns conceitos foram negligenciados pelo modelo.

Através do estudo de artigos existentes na literatura científica é possível perceber que a preocupação com a geração e o uso de energia dentro de uma fábrica também é uma tendência da Indústria 4.0. Espera-se que a indústria do futuro não somente esteja apta a produzir melhores produtos em um menor espaço de tempo, mas também gerar sua própria parcela de energia a ser consumida neste processo. Isto garantirá uma redução de custos na compra de energia a longo prazo. Caso o projeto de geração de energia seja pensado de modo a exceder o que se consome pela fábrica, o excedente gerado poderá ser vendido nas redes de distribuição, garantindo uma fonte extra de recursos financeiros.

Devido a crescente preocupação com a natureza e o meio ambiente, a energia nestas fábricas deverá ser gerada em fontes de energia renovável, tais como placas solares e usinas eólicas. O consumo da energia também deverá contar com avanços tecnológicos para se evitar o máximo possível desperdícios durante o processo produtivo. Levar em consideração o papel da indústria do futuro como um agente regulador dos impactos ambientais que causa também é fundamental para assegurar competitividade no mercado global, visto que esta é uma preocupação cada vez mais

em evidência dentro da sociedade e que se reflete também nos hábitos de consumo da população. Desta forma, o autor deste trabalho considera importante que estes conceitos sejam integrados ao modelo de Indústria 4.0 para adequá-lo ainda mais ao que se espera da indústria no futuro.

Outra possível sugestão para melhoria do *modelo de avaliação* se baseia no fato de que o modelo contou com apenas um especialista avaliador no método AHP para gerar os pesos de importância; o ideal seria que vários especialistas do setor automobilístico pudessem ser avaliadores nesta parte do modelo e os pesos de importância pudessem ser retirados através de uma média geométrica entre os resultados obtidos de cada avaliador. Acredita-se que este processo poderia traduzir de forma mais fidedigna a situação do setor automobilístico avaliado, uma vez que os resultados estariam pautados na opinião de um número maior de estudiosos da área. O mesmo pode-se dizer quanto aos especialistas avaliadores do método PROMETHEE; o ideal seria que existissem mais de um avaliador para a mesma empresa e que se fizesse uma média geométrica dos valores obtidos, deste modo, garantindo também notas mais próximas da realidade tecnológica de cada empresa.

Brezinski & Venâncio (2017) demonstram que a criação de um aplicativo para smartphones que emprega métodos multicritérios em análises organizacionais pode ter grande utilidade para as empresas e conseqüentemente facilitar muito o acesso aos modelos de avaliação. Portanto, segue-se como última sugestão para continuidade deste estudo que os próximos esforços visem a transferência do *modelo de avaliação* criado neste trabalho para aplicativos, de forma a tornar este modelo mais acessível e de fácil empregabilidade em ambientes organizacionais.

## REFERÊNCIAS

BAUER, W.; et al. Transforming to a Hyper-connected Society and Economy – Towards an “Industry 4.0”. *Procedia Manufacturing*. Stuttgart, v. 3, p. 417 – 424, out. 2015.

BECHTOLD, J.; et al. **Industry 4.0 – The Capgemini Consulting View: Shapening the Picture Beyond the Hype**. Capgemini – 2014.

BLANCHET, M.; et al. **Industry 4.0: The new industrial revolution: How Europe will succeed**. Roland Berger Strategy Consultants – Alemanha, mar. 2014.

BLOEM, J.; et al. **The Fourth Industrial Revolution: Things to Tighten the Link Between IT and OT**. Vint Research Report 3 of 4. SOGETI – Groningen, 2014.

BOAS, C. L. V. Análise da aplicação de métodos multicritérios de apoio à decisão (MMAD) na gestão de recursos hídricos. **Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos**, v. 16, 2005.

BOGDANOVIC, D.; et al. Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 84, n. 1, pp.219-233. 2012.

BRANS, J. P.; MARESCHAL, B. PROMETHEE methods. In: **Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys**. Springer New York, 2005. p. 163-186.

BRANS, J. P.; VINCKE, Ph. Note—A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). **Management science**, v. 31, n. 6, p. 647-656, 1985.

BRETTEL, M.; et al. 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, p. 37 – 44, 2014.

BREZINSKI, Guilherme L.; VENÂNCIO, André L. A. C. **Sistema de avaliação de maturidade industrial baseando-se nos conceitos de Indústria 4.0**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

DE SÁ, K. V. B. Metodologias Multicriteriais e as decisões sobre investimentos geridos pela área de novos negócios das empresas. In: **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 32, out. 2012. Rio Grande do Sul: ENEGEP, 2012.

GE INTELLIGENT PLATFORMS. **The Rise of Industrial Big Data**: Leveraging large time-series data sets to drive innovation, competitiveness and growth – capitalizing on the big data opportunity. General Electric Automation, 2012.

GEISSBAUER, R. et al. **Industry 4.0: Building the digital enterprise**: The global Industry 4.0 Survey. PWC – 2016.

HENDRIKS, Margriet MWB et al. Multicriteria decision making. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 16, n. 3, p. 175-191, 1992.

HUANG, Y.; LI, W. A study on aggregation of TOPSIS ideal solutions for group decision-making. **Group Decision and Negotiation**, v. 21, n. 4, p. 461-473, 2012.

IEEE.HELLINGER, A.; SEEGER, H. **Cyber-Physical Systems: Driving force for innovation in mobility, health, energy and production**. Acatech – Alemanha, dec. 2011.

KAGERMANN H.; et al. **Securing the future of German manufacturing industry: recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0: final report of the industrie 4.0 working group**. Acatech - Alemanha, 2013.

LASI, H.; et al. Industry 4.0. **Business and Information Systems Engineering**. Stuttgart, v.6, n.4, p. 239 – 242, jun. 2015.

LEE, J.; et al. Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. **Procedia CIRP**. Estados Unidos da América: v. 16, p.3-8, 2014.

LIAO, Y.; et al. A novel approach for ontological representation of analytic hierarchy process. **Advanced Materials Research**, v. 945, p. 675-682, 2014.

LIAO, Y.; et al. Past, present and future of Industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 12, p. 3609-3629, 2017.

LOM, M.; et al. Industry 4.0 as a part of smart cities. In: **Smart Cities Symposium Prague (SCSP)**. Praga: IEEE, p. 1-6, mai. 2016.

LYDON, B. Industry 4.0: Intelligent and flexible production: Digitization improves manufacturing responsiveness, quality, and efficiency. Revista: **InTech Magazine [online]**. ISA: mai-jun. 2016. Disponível na Internet: <https://www.isa.org/intech/20160601/> [acessado em: 24/11/2016]

MELL, P.; GRANCE T. **The NIST Definition of Cloud Computing**. Computer Security Division Information Technology Laboratory National Institute of Standards and Technology – Estados Unidos da América, set. 2011.

MENDES, P.; et al. A maturity model for demand-driven supply chains in the consumer product goods industry. **International Journal of Production Economics**. v. 179, p. 153 – 165, set. 2016.

OBTIKO, M.; JIRKOVSKY V. Big Data Semantics in Industry 4.0. **Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems**. Praga, República Tcheca: Springer International Publisher, p. 217 – 229, 2015.

ORLANDI, P. **Qualificação de Fornecedores da Indústria do Petróleo e Gás em Níveis de Desempenho com a Utilização do Método ELECTRE TRI**. Curitiba, 2016. 77 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção), Pontifícia Universidade Católica, 2016.

PÉREZ, F; ET AL. A CPPS Architecture approach for Industry 4.0. In: **IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)**, 20, p. 1 – 4, set. 2015.

POHEKAR, S. D.; RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 8, n. 4, p. 365-381, 2004.

PORTER, M. E.; HEPPELMANN J. E. How Smart, Connected Products Are Transforming Competition. **Harvard Business Review** – Estados Unidos América, nov. 2014.

RADZIWON, A; et al. The smart factory: exploring adaptive and flexible manufacturing solutions. **Procedia Engineering**. Viena: v. 69, p.1184-1190, 2014.



ROBLEK, V.; et al. A Complex View of Industry 4.0. **Sage Open**, v.6, n. 2, p. 1 – 11, abr-jun. 2016.

RODRIGUEZ, Michael; TRAINOR, Kevin. A conceptual model of the drivers and outcomes of mobile CRM application adoption. **Journal of Research in Interactive Marketing**, v. 10, n. 1, p. 67-84, 2016.

SAATY, Rozanne W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical modelling**, v. 9, n. 3, p. 161-176, 1987.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990.

SALDIVAR, A.A.F.; et al. Self-organizing tool for smart design with predictive customer needs and wants to realize Industry 4.0. In: **IEEE World Congress on Computational Intelligence**. Vancouver – jul. 2016.

SATURNO, M; et al. Evaluation of interoperability between automation systems using multi-criteria methods. **27<sup>th</sup> International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing**, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy.

SCHLECHTENDAHL, J.; et al. Making existing production systems Industry 4.0-ready. **Production Engineering**. Stuttgart, v.9, n.1, p. 143 – 148, out. 2014.

SHROUF, F.; et al. Smart factories in industry 4.0: a review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of things paradigm. In: **2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**. IEEE, 2014. p. 697-701.

SNIDERMAN, B.; et al. **Industry 4.0 and manufacturing ecosystems**: Exploring the world of connected enterprises. Delloite University Press – Estados Unidos da América, 2016.

SRIKRISHNA S.; et al. A New Car Selection in the Market using TOPSIS Technique. **International Journal of Engineering Research and General Science**, v. 2, fasc. 4, p. 177 – 181, 2014.

VERMESAN, O.; FRIESS, P. **Internet of Things: From Research and Innovation to Market Deployment**. 1. ed. Aalborg: River Publishers, 2014.

WAN, Jiafu et al. Enabling cyber–physical systems with machine–to–machine technologies. **International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing**, v. 13, n. 3-4, p. 187-196, 2013.

WOLTER, M. I.; et al. **Industry 4.0 and the consequences for labour market and economy**: Scenario calculations in line with the BIBB – IAB qualifications and occupational field projections. Institute for Employment Research of the Federal Employment Agency – Nuremberg, 2015.