



**CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL**  
**E TECNOLOGIA INDUSTRIAL**

**ANDRÉ SOUZA OLIVEIRA**

**Proposta de modelo em redes bayesianas para apoio à tomada  
de decisão visando produtos sustentáveis**

**Salvador**  
**2021**

**ANDRÉ SOUZA OLIVEIRA**

**Proposta de modelo em redes bayesianas para apoio à tomada  
de decisão visando produtos sustentáveis**

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação de Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial, Curso de Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI CIMATEC, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Renelson R. Sampaio  
Coorientador: Prof. Dr. Cristiano V. Ferreira

**Salvador  
2021**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

O46p Oliveira, André Souza

Proposta de modelo em redes bayesianas para apoio à tomada de decisão visando produtos sustentáveis / André Souza Oliveira. – Salvador, 2021.

165 f.: il. Color.

Orientador: Prof. Dr. Renelson Ribeiro Sampaio  
Coorientador: Prof. Dr. Cristiano Vasconcellos Ferreira

Tese (Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2021. Inclui referências.

1. Modelagem computacional. 2. Tecnologia - Sustentabilidade. 3. Tecnologia - Confiabilidade. 4. Redes bayesianas. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Sampaio, Renelson Ribeiro. III. Ferreira, Cristiano Vasconcellos. IV. Título.

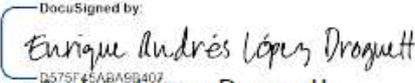
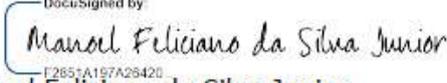
CDD 511.8



## Centro Universitário SENAI CIMATEC

### Doutorado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, leu e aprovou a Tese de doutorado, intitulada "Proposta de Modelo em Redes Bayesianas para Apoio à Tomada de Decisão Visando Produtos Sustentáveis", apresentada no dia 05 de março de 2021, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

- Orientador:   
Prof. Dr. Renelson Ribeiro Sampaio  
SENAI CIMATEC
- Coorientador:   
Prof. Dr. Cristiano Vasconcellos Ferreira  
UFSC
- Membro Interno:   
Prof. Dr. Marcelo Albano Moret Simões Gonçalves  
SENAI CIMATEC
- Membro Externo:   
Prof. Dr. Enrique Andrés López Droguett  
UCH
- Membro Externo:   
Prof. Dr. Manoel Feliciano da Silva Junior  
CENPES
- Membro Externo:   
Prof. Dr. Rodrigo Santiago Coelho  
FIEB

Dedico este trabalho à minha esposa, Verena e filha, Stella, razões da minha vida. Aos meus pais, Zélia e Nonato, referências de dedicação, ética e da minha origem. Aos meus familiares e amigos, que mesmo com a minha ausência, não consigo imaginar a minha vida sem vocês.

## AGRADECIMENTOS

Aos orientadores, Prof. Dr. Renelson Sampaio e Prod. Dr. Cristiano Vasconcelos pela presença e conhecimento compartilhado em toda a jornada.

Ao Prof. Dr. Leone Andrade e ao SENAI CIMATEC por todo apoio e incentivo para a realização e conclusão deste doutorado.

Aos demais membros das bancas de qualificação e de defesa, professores Dr. Rodrigo Coelho, Dr. Enrique Droguett, Dr. Manoel Feliciano da Silva Júnior, Dr. Marcelo Moret e Dr. Valter Beal, pelas importantes contribuições.

Aos colegas que contribuíram diretamente para as produções acadêmicas e ao modelo: Profa. Dra. Bruna Machado, MSc. Bruno Caetano, Prof. Dr. Paulo Henrique (UFBA), Luiz Miguel Sergani e MSc. Arilma Tavares.

Ao prof. Dr. Alex Álisson e aos Professores dos Programas de Pós-Graduação do Centro Universitário SENAI CIMATEC, pelas contribuições nas aulas, seminários e disciplinas, em especial, aos professores, Dr. Valter de Senna, Dr. Hernane Pereira e Dra. Lilian Lefol.

Aos colegas de jornada de doutorado: Dr. Daniel Motta e Dr. Flavio Marinho.

Aos colegas do SENAI CIMATEC, compreendendo a ausência e apoiando sempre.

Aos colegas do grupo de estudo da Oficina do Saber pelas orientações, críticas, apoio e disciplina nesta jornada acadêmica.

Ser é fazer - Aristóteles

Fazer é ser - Platão

## RESUMO

No cenário mundial atual de chegada de novas tecnologias, INDÚSTRIA 4.0, mobilidade, e principalmente, em um ambiente de pandemia, o tema sustentabilidade demanda proposições assertivas e uma destas ações refere-se ao projeto de produtos sustentáveis. Diversos autores têm estudado a disciplina científica de Life Cycle Engineering (LCE), que engloba as dimensões ambiental, social e econômica. Contudo, os atuais modelos da LCE possuem lacunas como a necessidade de incorporar uma visão mais holística, a incerteza, uma análise integrada e a criação de indicadores mais robustos para a dimensão social. A partir desta contextualização, neste trabalho, foi desenvolvido um modelo integrado de apoio ao processo de tomada de decisões que pode ser empregado no desenvolvimento de produto e tecnologia, considerando as dimensões ambiental, custo, social, tecnologia e confiabilidade. A incorporação das dimensões da tecnologia e da confiabilidade objetivou dar uma visão mais sistêmica ao modelo atual da LCE. Para a tecnologia, definiu-se o conceito de sustentabilidade da tecnologia (ST) e elaborou-se um arranjo com as perspectivas de mercado, da técnica e do escalonamento da tecnologia. A incorporação da dimensão da confiabilidade e suas metodologias inseriu a consequência da falha na sustentabilidade e a visão do cliente. Para dimensão social, foram selecionados indicadores mais robustos e atuais. O modelo computacional utilizou as redes bayesianas híbridas, que se baseiam na teoria probabilística e incorpora a análise da incerteza através de indicadores de sustentabilidade. O modelo demonstrou ter a flexibilidade de utilizar diferentes cenários externos e englobar variáveis quantitativas e qualitativas através da opinião de especialistas. Os resultados da aplicação do modelo em um projeto de pesquisa aplicada atestam que o mesmo se estabelece como uma ferramenta analítica de apoio à tomada de decisões, visando produtos mais sustentáveis. A criação do painel de controle consolidou os resultados de todas as simulações e inferências, viabilizando uma melhor visualização e análise dos resultados. Finalmente, verificou-se que o modelo permite ser aplicado em diversas circunstâncias, como o desenvolvimento de estratégia ou seleção de produtos mais sustentáveis, como também, para avaliação de produtos concorrentes.

Palavras-chave: Modelagem computacional; Tecnologia - Sustentabilidade; Tecnologia - Confiabilidade; Redes Bayesianas.

## ABSTRACT

*In the current world scenario of the arrival of new technologies, industry 4.0, mobility, and a pandemic environment, the sustainability theme demands assertive propositions. One of these actions refers to the design of sustainable products. Several authors have studied the scientific discipline of Life Cycle Engineering (LCE), which encompasses environmental, social, and economic dimensions. However, current LCE models have gaps, such as the need to incorporate a more holistic view, uncertainty, an integrated analysis, and the creation of more robust indicators for the social dimension. From this context, this work developed an integrated model to support the decision-making process that can be used in product and technology development, considering the environmental, cost, social, technology, and reliability dimensions. The incorporation of the dimensions of technology and reliability aimed to give a more systemic view of the current LCE model. For technology, the concept of technology sustainability (TS) was defined, and an arrangement was elaborated with the market, technical, and technology scaling perspectives. Incorporating the reliability dimension and its methodologies inserted the consequence of the failure in sustainability and the customer's view. For the social dimension, more robust and current indicators were selected. The computational model used the hybrid Bayesian networks, based on probabilistic theory, and incorporates uncertainty using sustainability indicators. The model demonstrated the flexibility to use different external scenarios and include quantitative and qualitative variables through experts' opinions. The results of using the model in an applied research project attest that it establishes as an analytical tool to support decision making, aiming at more sustainable products. The control panel's creation consolidated all simulations and inferences, enabling better visualization and analysis of the results. Finally, the model allows it to be applied in various circumstances, such as developing a strategy or selection of more sustainable products, as well as for the evaluation of competing products.*

*Key words: Computational modeling; Technology - Sustainability; Technology - Reliability; Bayesian Networks.*

## Sumário

<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES .....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....</b>	<b>15</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>17</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1. CONTEXTO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2. QUESTÃO DE PESQUISA.....</b>	<b>23</b>
<b>1.3. OBJETIVOS .....</b>	<b>23</b>
<b>1.4. RESULTADOS ESPERADOS.....</b>	<b>24</b>
<b>1.5. METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DA TESE.....</b>	<b>24</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO E DE TECNOLOGIA .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2. MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3. LIFE CYCLE ENGINEERING – LCE.....</b>	<b>36</b>
<b>2.4. TECNOLOGIA.....</b>	<b>42</b>
<b>2.5. CONFIABILIDADE .....</b>	<b>49</b>
<b>2.6. OPORTUNIDADES DE INOVAÇÃO NOS ESTUDOS REFERENTES A LCE</b>	
<b>60</b>	
<b>3. PROPOSTA DE MODELO EM REDES BAYESIANAS PARA APOIO À TOMADA DE DECISÃO VISANDO PRODUTOS SUSTENTÁVEIS .....</b>	<b>62</b>
<b>3.1. DIMENSÃO AMBIENTAL .....</b>	<b>70</b>
<b>3.2. DIMENSÃO CUSTO .....</b>	<b>73</b>
<b>3.3. DIMENSÃO SOCIAL .....</b>	<b>74</b>
<b>3.4. DIMENSÃO SUSTENTABILIDADE DA TECNOLOGIA .....</b>	<b>77</b>
<b>3.5. DIMENSÃO CONFIABILIDADE .....</b>	<b>85</b>
<b>3.6. RESUMO DAS ETAPAS PARA USO DO MODELO .....</b>	<b>87</b>

<b>4. APLICAÇÃO DO MODELO: PROJETO CONCRETO POLIMÉRICO .....</b>	<b>89</b>
<b>4.1. MENSURAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO MODELO .....</b>	<b>91</b>
<b>4.1.1. DIMENSÃO AMBIENTAL.....</b>	<b>91</b>
<b>4.1.2. DIMENSÃO CUSTO .....</b>	<b>93</b>
<b>4.1.3. DIMENSÃO SOCIAL .....</b>	<b>94</b>
<b>4.1.4. DIMENSÃO SUSTENTABILIDADE DA TECNOLOGIA.....</b>	<b>94</b>
<b>4.1.5. DIMENSÃO CONFIABILIDADE .....</b>	<b>98</b>
<b>4.2. SIMULAÇÕES .....</b>	<b>102</b>
<b>4.2.1. CENÁRIOS E INFERÊNCIAS.....</b>	<b>104</b>
<b>4.2.2. QUADRO RESUMO DAS SIMULAÇÕES .....</b>	<b>114</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>115</b>
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>121</b>
<b>A. REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA.....</b>	<b>141</b>
<b>B. ALGORITMO PARA ESTIMAR CURVA S.....</b>	<b>150</b>
<b>C. AVALIAÇÃO DAS 5 FORÇAS DE PORTER E CAPACIDADE DE ESTRUTURAÇÃO .....</b>	<b>152</b>
<b>D. ALGORITMO PARA ESTIMAR A CONFIABILIDADE.....</b>	<b>161</b>

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

AIC - *Akaike information criterion*

AHP – *Analytic Hierarchy Process*

ALT – *Accelerated Life Testing*

BIC – *Bayesian information criterion*

BOP – *Blowout preventer*

CIMATEC – *Campus Integrado de Manufatura e Tecnologia*

CNAE – *Classificação Nacional de Atividades Econômicas*

CRL – *Customer Readiness Level*

DA – *Degradation Analysis*

DfR - *Design for Reliability*

DIEESE – *Departamento Intersindical de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos*

DIP – *Desenvolvimento Integrado de Produto*

DL – *Deep Learning*

DNV-GL – *Det Norske Veritas Germanischer Lloyd*

ECDC – *European Centre for Disease Prevention and Control*

ECV – *Engenharia do Ciclo de Vida*

ELECTRE – *Elimination Et Choice Translation Reality*

FMEA - *Failure Mode and Effect Analysis*

FMECA – *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*

FTA – *Fault Tree Analysis*

GII – *Global Innovation Index*

HALT – *Highly Accelerated Life Testing*

HAZID – *Hazard Identification Study*

HAZOP – *Hazard and Operability Study*

ISO – *International Organization for Standardization*

IRL – *Integration Readiness Levels*

LCA – *Life Cycle Assessment*

LCC – *Life Cycle Costing*

LCE – *Life Cycle Engineering*

LCM – *Life Cycle Management*

MACBETH – *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*

MAUT – *Multi-Attribute Utility Theory*

MCA – *Monte Carlo Analysis*

MFTA – *Multi-state Fault Tree Analysis*

MLE – *Maximum Likelihood Estimation*

MRL – *Manufacturing Readiness Level*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

ODS – *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*

OIT – *Organização Internacional do Trabalho*

ONU – *Organização das Nações Unidas*

PD&I – *Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação*

P&D – *Pesquisa & Desenvolvimento*

PDP – *Processo de Desenvolvimento de Produto*

PDT – *Processo de Desenvolvimento de Tecnologia*

PHM – *Prognostics and Health Management*

PRA – *Probabilistic Risk Assessment*

PROMÉTHÉE – *Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations*

QRA – *Quantitative Risk Analysis*

RB – *Redes Bayesianas*

RBD – *Reliability Block Diagram*

RG – *Reliability Growth*

RMSE – *Root Mean Square Error*

SENAI – *Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial*

SLC – *Social Life Cycle*

SRL – *Societal Readiness Level*

SRL – *System Readiness Level*

ST – *Sustentabilidade da Tecnologia*

VA – *Visual Analytics*

TPN – Tabela probabilística de nós

TLC – *Technology Life Cycle*

TRL – *Technology Readiness Level*

TRACI – *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts*

TRM – *Technology Road Mapping*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Histórico da sustentabilidade.....	20
Figura 2 Etapas do desenvolvimento do trabalho.....	25
Figura 3 Comparação entre a 2ª e a 3ª Geração do PDP. ....	27
Figura 4 Processo de desenvolvimento integrado de produto.....	28
Figura 5 Exemplo de Rede Bayesiana.....	34
Figura 6 Estágios do ciclo de vida do produto. ....	37
Figura 7 Estrutura atual da LCE. ....	38
Figura 8 Taxonomia da LCE. ....	41
Figura 9 Cinco Forças que moldam a competição.....	45
Figura 10 Curva S no conceito do ciclo de vida da tecnologia.....	46
Figura 11 Confiabilidade aplicada ao PDP. ....	55
Figura 12 Artigos das ferramentas da confiabilidade.....	57
Figura 13 Artigos sobre distribuições de probabilidade e confiabilidade. .....	59
Figura 14 Novo modelo conceitual da LCE, incluindo as dimensões da Tecnologia e Confiabilidade. ....	63
Figura 15 Estrutura do modelo proposto neste estudo. ....	64
Figura 16 Modelo da Sustentabilidade. ....	66
Figura 17 Variável Sustentabilidade. ....	69
Figura 18 Grafo acíclico da dimensão Ambiental. ....	71
Figura 19 Grafo acíclico da dimensão Custo. ....	73
Figura 20 COVID-19 – Média móvel (14 dias) / MM Habitantes. ....	75
Figura 21 Grafo acíclico da dimensão Social.....	76
Figura 22 Grafo acíclico da Sustentabilidade da Tecnologia.....	79
Figura 23 Grafo acíclico da dimensão Confiabilidade.....	86
Figura 24 Etapas para utilização do modelo.....	87
Figura 25 Projeto Concreto Polimérico. ....	90
Figura 26 Curvas S estimadas e real.....	97
Figura 27 Gráfico TTT para os tempos de falha do ferro fundido (a) e do concreto polimérico (b). ....	100

Figura 28 (A): Curvas de confiabilidade estimadas (linhas tracejadas), sobrepostas às estimativas de Kaplan-Meier (linhas contínuas). (B): Curvas de taxa de falha estimadas. ....	101
Figura 29 Painel de Controle. ....	104
Figura 30 Resultados obtidos no cenário velho normal. ....	106
Figura 31 Resultados obtidos no cenário novo normal. ....	107
Figura 32 Resultados obtidos no cenário sem vacina. ....	109
Figura 33 Resultados obtidos no cenário base. ....	110
Figura 34 Resultados obtidos na hipótese do CP ter TRL e MRL iguais a 9. ....	111
Figura 35 Resultados obtidos na hipótese de redução do impacto ambiental do FF em 50%. ....	112
Figura 36 Resultados obtidos na hipótese do CP com TRL e MRL 9 comparado com o FF com redução de 50% no LCA. ....	113
Figura 37 Modelo para revisão bibliográfica sistemática ....	141
Figura 38 Procedimento iterativo da fase de processamento ....	143
Figura 39 Número de artigos por ano ....	144
Figura 40 Autores com mais publicações ....	144
Figura 41 Número de artigos por revista. ....	145

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 Métodos de tomada de decisão. ....	35
Tabela 2 Quadro de metodologias da avaliação da tecnologia. ....	48
Tabela 3 Metodologias da confiabilidade no PDP. ....	55
Tabela 4 Distribuições probabilísticas no estudo da confiabilidade. ....	58
Tabela 5 Principais lacunas identificadas na revisão de literatura. ....	60
Tabela 6 Tabela padronizada para descrição de variável do modelo. ...	68
Tabela 7 Variável Sustentabilidade, Pesos e Cenários Externos. ....	69
Tabela 8 Variável Ambiental. ....	71
Tabela 9 Variável Energia. ....	72
Tabela 10 Variável Poluição. ....	72
Tabela 11 Variáveis medidas na LCA. ....	72
Tabela 12 Variáveis da dimensão Custo. ....	73
Tabela 13 Variáveis da dimensão Social. ....	76
Tabela 14 Variáveis da dimensão ST. ....	80
Tabela 15 Variáveis do Escalonamento da Tecnologia. ....	80
Tabela 16 Variáveis das Cinco Forças de Porter. ....	82
Tabela 17 Modelos de curvas de crescimento. ....	84
Tabela 18 Variáveis da dimensão Confiabilidade. ....	86
Tabela 19 Variáveis da LCA - Ferro Fundido e Concreto Polimérico. ...	92
Tabela 20 Limites superiores e inferiores das TPN. ....	92
Tabela 21 Histograma do Custo Unitário – R\$. ....	93
Tabela 22 Taxa de acidentes com afastamento. ....	94
Tabela 23 Casos Covid 19 dia / MM. ....	94
Tabela 24 Estimativas de TRL e MRL. ....	95
Tabela 25 Variáveis a priori da ST. ....	95
Tabela 26 Métricas para seleção de modelo. ....	96
Tabela 27 Estimativa da variável Curva S. ....	98
Tabela 28 Estimativa da Confiabilidade. ....	102
Tabela 29 Simulação para definir número de amostras. ....	103
Tabela 30 Comparação entre o FF e o CP. ....	114
Tabela 31 Probabilidade de ser sustentável. ....	114
Tabela 32 Resumo da revisão sistemática de literatura. ....	143
Tabela 33 Artigos priorizados. ....	146

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONTEXTO

Ao longo das últimas décadas, a sustentabilidade vem ganhando mais importância no cenário econômico global, devido à pressão da sociedade. Inicialmente, havia na dimensão ambiental a sua referência, e, com o tempo, passou a englobar outras dimensões, como: social, econômica e tecnológica (PEÇAS et al., 2009, 2016; STARK et al., 2014). Atualmente, num ambiente de pandemia, o tema sustentabilidade ganha proposição mais assertiva em busca de uma transição energética (KUZEMKO et al., 2020) e de revisão do seu próprio conceito, incluindo de forma mais clara a saúde humana (HAKOVIRTA; DENUWARA, 2020).

Segundo Jenny et al. (DAVIS-PECCOUD et al., 2020), a urgência do tema pode afetar profundamente o ambiente das empresas, gerar incertezas em relação a transição energética (BP, 2020) e criar oportunidades com as mudanças tecnológicas (ECONOMIST, 2020). Ainda, pela perspectiva das empresas, o tema é considerado um dos mais importantes para os próximos anos (GLOBALDATA, 2020) e a carta do presidente de um dos principais fundos de investimento do mundo, o Blackrock, posicionou a sustentabilidade como um ponto central no processo de seleção de investimentos, levando a uma reformulação das finanças mundiais (FINK, 2020).

Numa perspectiva histórica, o ponto de partida do conceito da sustentabilidade está vinculado ao relatório proveniente de um estudo liderado pela ONU (Organização das Nações Unidas). Nele, o **desenvolvimento sustentável** foi definido como: “àquele que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades” (KEEBLE, 1988).

Em 1989, foi cunhado o termo **Economia Circular** que amparou o desenvolvimento de ferramentas mais conceituais que contribuíram para materializar o conceito da sustentabilidade (FOUNDATION, 2016; GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016). Seu princípio baseia-se numa economia que é restauradora e regenerativa, por projeto, e visa manter produtos, componentes

e materiais com a maior utilidade e valor possível o tempo todo. Esse novo modelo econômico busca, em última análise, dissociar o desenvolvimento econômico global do consumo finito de recursos, podendo gerar crescimento, criar empregos e ainda reduzir impactos ambientais (FOUNDATION, 2016; GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016).

Gradativamente, o termo sustentabilidade foi incorporando uma visão mais ampla, contribuindo para a divulgação e sensibilização da sociedade em torno do tema. Em 1997, o livro *Cannibals with Forks: **The triple bottom line** of 21st century business* apresenta a sustentabilidade suportada por três pilares: ambiental, econômico e social. Esta visão vai além das preocupações ecológicas, propondo uma redefinição do capitalismo que passa a prezar pela sustentabilidade de forma ampla, englobando as pessoas, o planeta e o lucro empresarial (ELKINGTON, 1997).

Neste mesmo contexto, na década de 1990, a **Life Cycle Engineering - LCE** ou Engenharia do Ciclo de Vida – ECV foi estruturada, com o objetivo de contribuir com o processo de quantificação e tomada de decisão (PEÇAS et al., 2016). O LCE é considerada uma disciplina científica que pode ser aplicada ao desenvolvimento de produtos, a seleção de tecnologia ou avaliação do nível de sustentabilidade (OUDE LUTTIKHUIS; TOXOPEUS; LUTTERS, 2015; PEÇAS; RIBEIRO; HENRIQUES, 2014; RIBEIRO et al., 2008). Ela está conectada ao modelo do *triple bottom line*, pois propõe uma análise das dimensões: ambiental, econômica e social (HEIJUNGS; HUPPES; GUINÉE, 2010).

No início deste século, foi desenvolvido o **Life Cycle Management - LCM**, um *framework* para a inserção do pensamento do ciclo de vida às práticas de negócio nas empresas. Através dele sistematiza-se este pensamento na elaboração da estratégia, no processo de planejamento, na tomada de decisão e na comunicação empresarial (SONNEMANN, 2006). Recentemente, em busca de uma agenda mais ambiciosa, a ONU propôs os 17 novos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) ou Objetivos Globais (ONU, 2015). Os ODS compõem um conjunto de 17 objetivos e 169 metas que foram desenvolvidos por intermédio de um amplo diálogo global e são considerados um chamado universal para ação contra a pobreza, para a proteção do planeta e para garantir que todas as pessoas tenham paz e prosperidade (ONU, 2015; PNUD BRASIL,

2015). De acordo com Pizzi et al. (PIZZI et al., 2020), a contribuição de estudiosos de negócios e gestão para a discussão em torno dos ODS e seus impactos para as organizações empresariais tem crescido exponencialmente nos últimos anos.

A partir desta contextualização, a Figura 1 apresenta o histórico do conceito da sustentabilidade e suas metodologias ao longo das últimas décadas. Observa-se que se trata de evoluções relevantes e significativas, entretanto o tema ainda requer o contínuo aprofundamento e ampliação de ações nos mais diversos níveis para uma transição mais rápida. Uma destas ações pode estar associada ao projeto de produtos sustentáveis que podem atender as expectativas crescentes dos clientes conscientes, como também, das demandas dos investidores para que as empresas façam mudanças nos produtos (WIESNER, 2020). Contudo, ressalta-se a complexidade do processo decisório que envolvem as dimensões ambiental, social e econômica (BUCHERT et al., 2015).

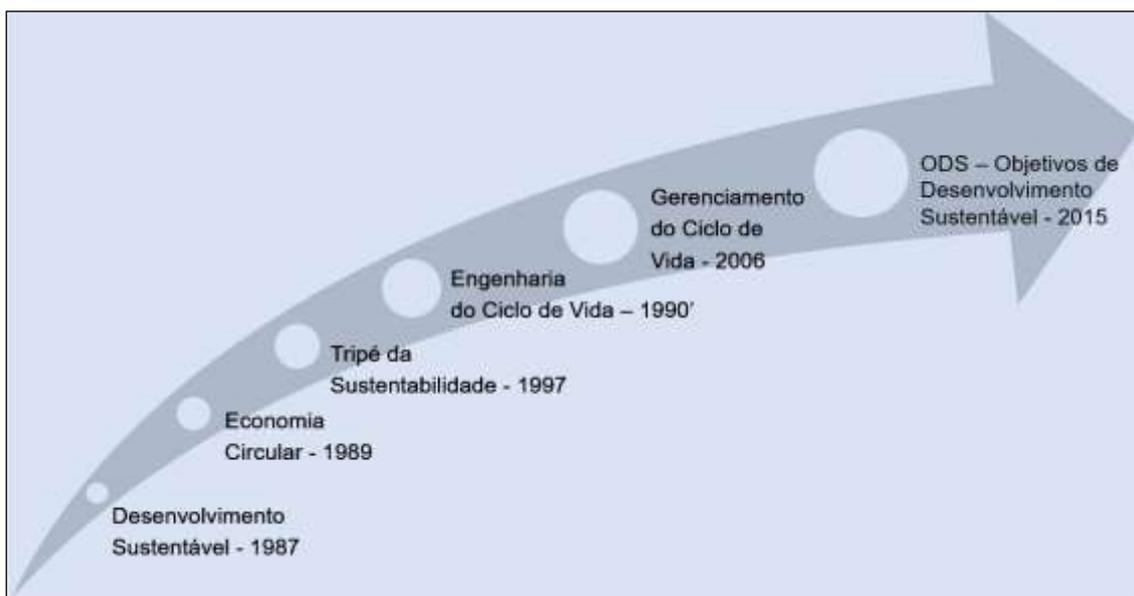


Figura 1 Histórico da sustentabilidade.

Fonte: Elaboração própria, 2020 (ELKINGTON, 1997; FOUNDATION, 2016; KEEBLE, 1988; ONU, 2015; PEÇAS et al., 2016; PNUD BRASIL, 2015; SONNEMANN, 2006).

Para o projeto de produtos sustentáveis, relata-se na literatura que metodologias de PDP podem ser um suporte (FERNANDES; CANGIOLIERI JÚNIOR; SANT'ANNA, 2017). Thomé et al. (THOMÉ et al., 2016) destacam que o PDP tradicional visa integrar pessoas, ferramentas e tecnologia para reduzir o tempo de lançamento e aumentar os ganhos econômicos. Também apontam que a

inclusão da sustentabilidade no PDP é uma área de pesquisa nova e em constante crescimento, entretanto ainda requer incluir uma visão mais holística. Para esta transição, também é demandado o desenvolvimento de tecnologia (DT), que representa um grande desafio (JAMALI et al., 2016) e podem ser chamadas de dupla inovação, pois englobam o PDP e DT ao mesmo tempo (BRILHUIS-MEIJER; PIGOSSO; MCALOONE, 2016).

Segundo Peças et al. (PEÇAS et al., 2016), a necessidade de desenvolvimento de modelos mais aplicados e menos conceituais é patente. As empresas, que terão o papel de liderar esta transição, necessitam de métodos mais práticos e não *frameworks* conceituais como propostos por (TAO; YU, 2018). Contudo, as fases iniciais de PDP possuem características que dificultam o desenvolvimento destes modelos, como a complexidade do processo decisório (BUCHERT et al., 2015) e a escassez de dados e informação (DROGUETT; MOSLEH, 2006).

Conforme Finkbeiner et al. e Ishii (FINKBEINER et al., 2010; ISHII, 1995), alguns avanços são notados na literatura, como é o caso da norma ISO 14040:2006, que tem o papel de estruturar a avaliação dos impactos ambientais de um produto no seu ciclo de vida. Contudo, a mesma norma recebeu críticas por uso de uma abordagem reducionista, pois não contemplam as inter-relações entre as variáveis (HALOG; MANIK, 2011). Outro exemplo de modelo que demonstra este avanço é o estudo desenvolvido por (KJÆR et al., 2015) que mostra os benefícios de avaliar de forma integrada as variáveis ambientais e de custo, contudo não analisa os impactos sociais previstos na LCE.

A partir da análise descrita acima, as questões referentes à inter-relação entre dimensões e à gestão da **incerteza** durante o processo de desenvolvimento de produtos e decisão (MUNTHE et al., 2014) devem ser cuidadosamente agregadas ao estudo da LCE. Além disso, duas outras dimensões são propostas na presente tese para serem incorporadas aos estudos e análises da LCE tradicional que avaliam as dimensões ambiental, custo e social. São elas: confiabilidade e tecnologia.

A primeira delas é a **confiabilidade**, dimensão intrinsecamente relacionada à perspectiva do cliente, pois os mesmos têm expectativa de que produtos adquiridos funcionem conforme anunciado pelo fabricante (DROGUETT;

MOSLEH, 2006). Na indústria, as empresas aéreas são cientes do custo da não confiabilidade; entretanto, outros segmentos sofrem com os custos associados e com a reputação decorrentes de falhas durante a garantia do produto (O'CONNOR; KLEYNER, 2012).

A NASA define a confiabilidade como: “o grau de plausibilidade de um componente ou sistema falhar durante um tempo especificado” (DEZFULI et al., 2009). A confiabilidade está intrinsecamente ligada a um contexto de mercado competitivo, que exige lançamentos de novos produtos em um intervalo de tempo cada vez menor e com clientes mais exigentes (LU et al., 1999). Ao mesmo tempo, a operação de sistemas de baixa confiabilidade, podem, em situações extremas, causar impactos combinados à vida humana, ao meio ambiente e financeiros, como o trágico acidente ocorrido em 2010 com uma sonda de petróleo (DEEPWATER HORIZON STUDY GROUP, 2011).

A segunda dimensão proposta para ser incorporada ao estudo da LCE é a **tecnologia**. A tecnologia, sob o enfoque do ciclo de vida, já é estudada por diversos autores (ADAMUTHE; THAMPI, 2019; MANN, 2003; SINNWELL; SIEDLER; AURICH, 2019a; YOON et al., 2014; ZARTHA et al., 2017), em outros contextos. Estes, buscam entender, quantificar e prever quando uma determinada tecnologia estará viável, madura ou obsoleta. Diversas técnicas associadas ao Ciclo de Vida da Tecnologia ou Prospecção Tecnológica já são amplamente aplicadas, mas desvinculadas às análises aplicadas à LCE (DAIM et al., 2006; GAO et al., 2013; INTEPE; BOZDAG; KOC, 2013; MARTINO, 1993; TRAPPEY et al., 2011).

Desta forma, o presente estudo **propôs o desenvolvimento de um modelo de apoio à tomada de decisão aplicado nas fases iniciais de PDP e / ou PDT, amparado em uma visão integrada e mais sistêmica, visando o desenvolvimento de produtos sustentáveis**. Para isso, agregou as dimensões da tecnologia e da confiabilidade às já existentes da LCE, isto é: ambiental, social e de custo. Adicionalmente, buscou refletir a incerteza e a complexidade do processo decisório inerentes ao contexto acima descrito com a utilização de ferramenta que dê este suporte teórico.

## 1.2. QUESTÃO DE PESQUISA

A partir dos desafios mencionados anteriormente, como: necessidade de transição mais rápida para a sustentabilidade; da incorporação de uma visão mais sistêmica da sustentabilidade no PDP e PDT; do desenvolvimento de modelos aplicados que levem em consideração a incerteza e a complexidade do processo decisório, a proposta desse estudo foi o de responder à seguinte questão de pesquisa:

Qual seria a modelagem computacional para incorporar as dimensões da tecnologia e da confiabilidade ao modelo atual da LCE no contexto de tomada de decisão no desenvolvimento de produto e tecnologia, considerando as suas características de incerteza e sistêmica?

## 1.3. OBJETIVOS

### **Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho foi o desenvolver um modelo integrado de apoio ao processo de tomada de decisão que pode ser empregado no desenvolvimento de produto e tecnologia, considerando como parâmetros as dimensões ambientais, de custo, social, da tecnologia e de confiabilidade.

### **Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

1. Desenvolver um modelo para avaliar a tecnologia;
2. Selecionar modelos para quantificar a confiabilidade em fases iniciais de desenvolvimento de produtos e tecnologias;
3. Selecionar a (s) ferramenta (s) computacional para desenvolvimento do modelo;
4. Desenvolver um modelo computacional de suporte à tomada de decisão, integrandos as dimensões: ambiental, de custo, social, da tecnologia e de confiabilidade;
5. Realizar aplicação do método e do modelo desenvolvido em uma situação real de projeto para avaliar as suas funcionalidades.

#### 1.4. RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se o desenvolvimento de um modelo de **apoio à tomada de decisão** que possa ser aplicado nas fases iniciais dos PDP e / ou PDT, visando o desenvolvimento de produtos sustentáveis. O modelo proposto deverá refletir as características de **incerteza e complexidade do processo decisório**. Adicionalmente, contemplará uma **visão mais holística e integrada** quando comparado às abordagens atuais, portanto **incorporará as dimensões da tecnologia e confiabilidade** às já existentes: de custo, ambiental e social.

O modelo proposto será aplicado a uma situação real de projeto que já foi concluído, cujos dados estão disponíveis para serem utilizados. Para fins de simplificação, o projeto selecionado tratará do desenvolvimento de um componente e contou com poucas amostras de ensaios mecânicos, de forma que o cálculo da confiabilidade foi feito de forma preliminar.

O modelo desenvolvido em **redes bayesianas** visa suportar às características acima mencionadas. Serão realizadas **simulações** que incluirão a estratégia de uso de **cenários distintos e realização de inferências**, visando simular uma situação real de tomada de decisão. Também se espera que o modelo possa ter uso tanto no contexto acadêmico, quanto empresarial, contribuindo para uma transição no rumo à sustentabilidade, além de ampliar o debate e possibilitar novos estudos.

Por fim, espera-se abrir novas perspectivas de estudos para o autor a partir da aplicação do modelo em outros projetos, além da melhoria do mesmo. Com o conhecimento adquirido nas redes bayesianas, possibilita-se desenvolver novos modelos decisórios que envolvam incerteza em outros campos das ciências aplicadas.

#### 1.5. METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DA TESE

O presente estudo é caracterizado como uma pesquisa de natureza aplicada, englobando uma abordagem qualitativa e quantitativa, que envolve as dimensões ambientais, econômicas, sociais, de confiabilidade e da tecnologia no âmbito da LCE. Do ponto de vista dos objetivos, pode-se classificar como

sendo de caracterização exploratória e explicativa. Utilizou-se de procedimentos de levantamento do estado da arte, modelagem e aplicação do método nas fases conceituais do desenvolvimento de produto e de tecnologia.

A Figura 2 apresenta as etapas realizadas durante o desenvolvimento do trabalho:

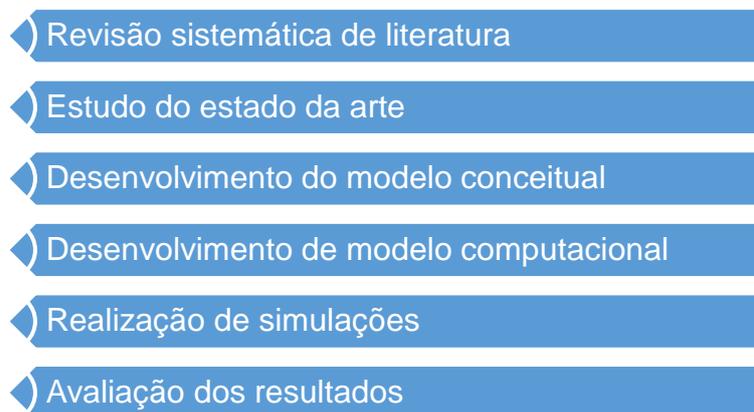


Figura 2 Etapas do desenvolvimento do trabalho.

Fonte: Elaboração própria (2020)

Este documento está organizado conforme se segue: o capítulo 2 contempla o estudo do estado da arte referente aos temas inerentes a tese: desenvolvimento de produto e tecnologia, métodos de tomada de decisão, LCE, tecnologia e confiabilidade. Em seguida, o capítulo 3 discorre sobre a proposta do modelo de tomada de decisão, além das metodologias estudadas e/ou das propostas para avaliação de cada uma das dimensões do estudo. O capítulo 4 apresenta a aplicação do modelo proposto e a avaliação dos resultados. Por fim, o capítulo 5 traz as considerações finais deste trabalho.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

Este capítulo tem como objetivo apresentar um estudo da revisão da literatura dos temas chaves da tese. Inicialmente, é apresentada uma visão geral do processo de desenvolvimento de produto e os métodos de tomada de decisão. Na sequência, são abordados a Life Cycle Engineering – LCE, a tecnologia e a confiabilidade. No final, é apresentado um sumário com as lacunas existentes.

### **2.1. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO E DE**

## TECNOLOGIA

O desenvolvimento de produtos é essencial para o sucesso econômico das empresas e é considerado como um conjunto de atividades que começam com a percepção de uma oportunidade de mercado e terminam na produção, venda e entrega de um produto (YAN; ZHOU; SEBASTIAN, 1999). Estas etapas fazem parte do ciclo de vida do produto e que pode ser conceituado como os diversos estágios que algum produto passa, desde sua concepção até o fim de seu uso, envolvendo toda a sua cadeia de suprimento (WIESNER, 2020).

As forças motrizes para o PDP são a sociedade, a tecnologia e o mercado, direcionando ações estratégicas empresariais (PERSSON, 2016). Novas demandas da sociedade, como a sustentabilidade, atualizam a forma de se desenvolver produtos, trazendo alternativas para a humanidade lidar com a produção e o consumo (MCDONOUGH; BRAUNGART, 2009). Neste mesmo sentido, (FERNANDES; CANGIOLIERI JÚNIOR; SANT'ANNA, 2017) propõem um método de PDP voltados para as estratégias ambientais.

Segundo (ALBERS; MEBOLDT, 2007), com o advento da engenharia simultânea e engenharia concorrente foram dados os primeiros passos para a 3ª geração do PDP. Nela, a abordagem muda de *gates* fixos para *fuzzy gates*, que são situacionais e condicionais (COOPER, 1994). Segundo o mesmo autor, a 2ª geração é muito focada nos requisitos e riscos técnicos. A Figura 3 apresenta uma comparação gráfica entre as duas gerações. Observa-se que a incerteza, representada pelos *fuzzy gates*, é uma característica na 3ª geração, na qual ocorre sobreposição de estágios ou decisões condicionais. Neste cenário de incerteza, (LI et al., 2018) sugere que o uso de redes bayesianas podem ser uma solução para lidar com a complexidade, incerteza e dinamismo durante o PDP.

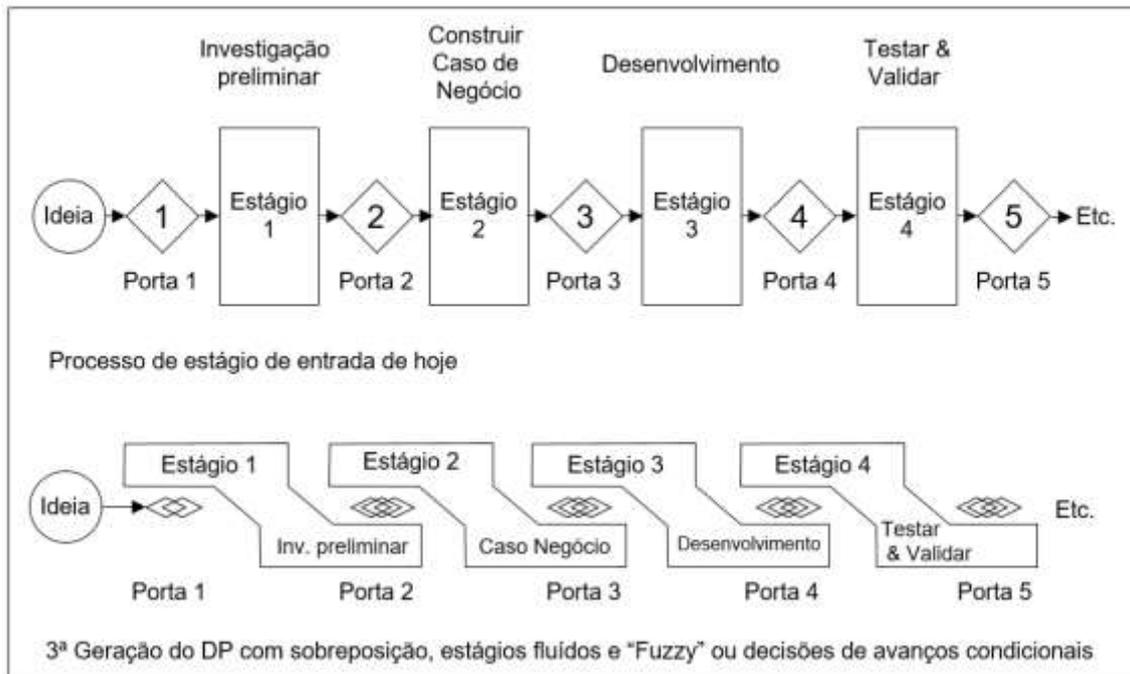


Figura 3 Comparação entre a 2ª e a 3ª Geração do PDP.

Fonte: Adaptado de (COOPER, 1994).

A chamada era do desenvolvimento integrado do produto (DIP) também congrega uma série de abordagens surgidas entre os anos de 1980 e 1990, como: Engenharia Simultânea, Funil e *Stage-Gates*. As suas principais características são: o DP é um processo, os processos de P&D e o PDP são reflexos da estratégia da empresa, a modularidade e projetos plataforma passam a ser uma constante, os times são multifuncionais, os fornecedores são envolvidos desde o início, e há simultaneidade e superposição de informações e de atividades (ROZENFELD et al., 2006; YANG; YU; SEKHARI, 2011).

Na Figura 4, o processo de DIP está organizado em fases (pré; desenvolvimento e pós) e, estas desdobram-se em etapas (planejamento estratégico de produtos; planejamento de projetos, projeto informacional, conceitual, detalhado, preparação da produção, lançamento do produto; acompanhamento do produto e processo; descontinuidade do produto). É importante observar que os losangos representados na cores vermelha e azul constituem *gates*, ou seja, pontos de tomadas de decisão, fundamentais em todo o PDP (ROZENFELD et al., 2006).

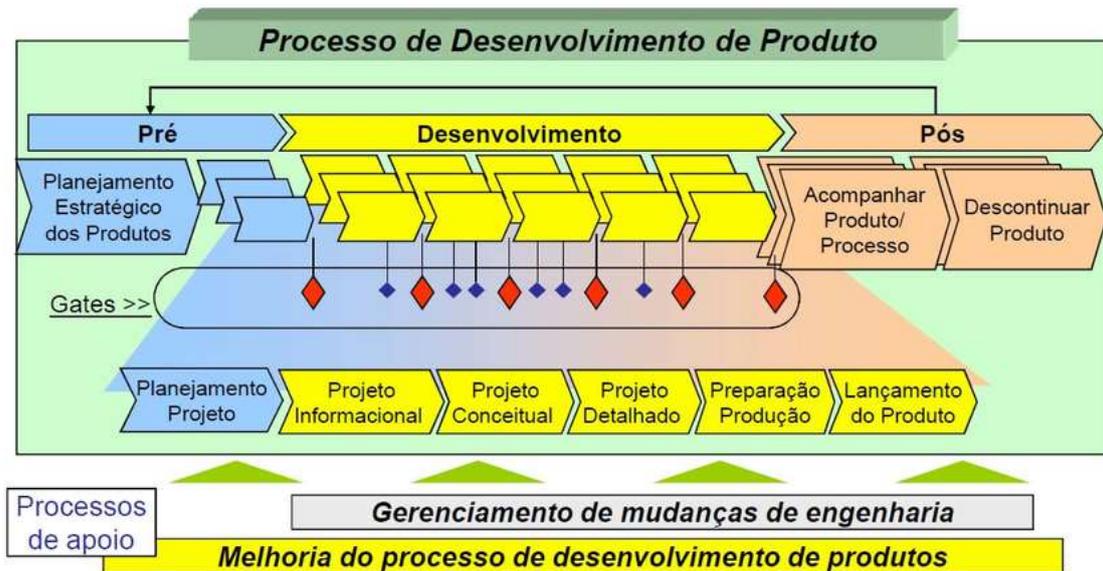


Figura 4 Processo de desenvolvimento integrado de produto.

Fonte:(ROZENFELD et al., 2006).

O PDP possui outras características relevantes em todo seu ciclo de vida: a multidisciplinaridade envolvida (QURESHI; GERICKE; BLESSING, 2014) e a necessidade de tomada de decisão em fases iniciais (HANSEN; ANDREASEN, 2004; HONKALA; HÄMÄLÄINEN; SALONEN, 2007; KLEIN et al., 2007). Particularmente, nas fases iniciais do PDP, quando poucos dados estão disponíveis é muito desafiador o processo de tomada de decisão (CERDAS; THIEDE; HERRMANN, 2018). Além disso, estas fases iniciais do PDP influenciam diretamente em aproximadamente 70% do custo do produto em seu ciclo de vida (SARAVI et al., 2008).

Desta forma, o custo de erros e alterações no projeto aumenta drasticamente ao longo processo de desenvolvimento de produtos, podendo ter um aumento de dez vezes no custo de uma fase para outra. Por isso que o desenvolvimento de ferramentas e métodos cada vez mais robustos que contribuam no processo de tomada de decisão são fundamentais (O'CONNOR; KLEYNER, 2012; ROZENFELD et al., 2006). Outro desafio para o PDP é agregar o processo de desenvolvimento de tecnologia, conforme descrito no estudo de (BRILHUIS-MEIJER; PIGOSSO; MCALOONE, 2016), no qual é proposto um modelo de referência chamado de dupla inovação. Conforme os autores, este modelo de referência consiste em duas trilhas de desenvolvimento vinculadas, uma para a

tecnologia e outra para o produto, as quais são trabalhadas simultaneamente. A interdependência é capturada através dos requisitos de nível de prontidão de tecnologia nos *gates*. O modelo visa fornecer informações sobre a necessidade de interação contínua com o objetivo de facilitar a comunicação e a transferência de conhecimento.

A partir da observação de todo o contexto e complexidade do processo de desenvolvimento de tecnologia e produto, são apresentadas, a seguir, as diferentes abordagens e metodologias de tomada de decisão que são fundamentais para este cenário.

## 2.2. MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO

A tomada de decisão associada à avaliação e gestão da incerteza são cada vez mais importantes em distintos campos científicos (MUTLU; TUZKAYA; SENNAROĞLU, 2017; TEGELTIJA et al., 2018). Pela perspectiva dos negócios, poucas coisas são tão valiosas quanto a capacidade de tomar boas decisões, contudo, decisões de baixa qualidade são consideradas, por alguns autores, endêmicas (SPETZLER; WINTER; MEYER, 2016). De acordo com os mesmos autores, os seis principais elementos que devem ser endereçados para um bom processo decisório são: um quadro claro e apropriado do problema; alternativas criativas; informações relevantes e confiáveis; valores claros e seus respectivos prós e contras; raciocínio sólido e compromisso com a ação (SPETZLER; WINTER; MEYER, 2016).

Estas etapas estão associadas ao ciclo de avaliação, conforme um dos estudos seminais para o tema de tomada de decisão (HOWARD, 1968). Na primeira etapa, chamada de determinística, o objetivo é construir o modelo de decisão. Em seguida, na fase probabilística, obtem-se as distribuições probabilísticas das variáveis, incorporando, assim a incerteza e risco na análise. Por fim, a fase informacional, avalia se há a necessidade de se obter mais informações. Este ciclo se repete até o momento em que avança para o processo decisório (HOWARD, 1968).

Para o contexto da presente tese são observadas as seguintes características do processo decisório:

- presença de incerteza (KLEIN et al., 2007),
- avaliação de cenários alternativos (HANSEN; ANDREASEN, 2004),
- existência de variáveis quantitativas, como também informações subjetivas (HONKALA; HÄMÄLÄINEN; SALONEN, 2007),
- interdependência entre variáveis (IONICA; LEBA, 2015),
- diferentes dimensões (BUCHERT et al., 2015), e
- presença de variáveis não determinísticas (PETER; SWILLING, 2014).

A revisão sistemática da literatura realizada, apontam possíveis caminhos para a escolha de ferramentas ou técnicas que sejam aplicáveis ao objetivo deste estudo. Por exemplo, pelo lado da LCE, podem ser citadas a análise multicritério, as redes bayesianas e a lógica *fuzzy* (AFRINALDI; ZHANG, 2014; EGILMEZ et al., 2016; LEE et al., 2016, 2017; MURTHY, 1979; NANJO et al., 2014; ZHU; DESHMUKH, 2003). Em se tratando de confiabilidade, convém destacar que as redes bayesianas e a lógica *fuzzy* também são utilizadas (AZARKHAIL; MODARRES, 2012; DROGUETT; MOSLEH, 2006; LEE; PAN, 2018; LEIMEISTER; KOLIOS, 2018; YADAV et al., 2003).

Os **métodos multicritérios** são divididos pelas Escola Americana e Européia. A primeira têm como fundamentação teórica a noção de se agregar todas as informações acerca do problema por meio de uma grande síntese (RANGEL; GOMES, 2010). Exemplos desses métodos são o *Multi-Attribute Utility Theory - MAUT* (KEENEY; RAIFFA, 1993) e os métodos de análise hierárquica, dentre estes, o mais conhecido é o método *Analytic Hierarchy Process - AHP* (SAATY, 2001).

O MAUT permite avaliar em contextos de vários objetivos, identificando *trade-offs* e comparando os vários objetivos de maneira consistente, como também, permite trabalhar com diferente alternativas simultaneamente (MIN, 1994). Segundo (AYALA; FRANK, 2013), o método MAUT avalia subjetivamente um critério quantitativo ou qualitativo, podendo levar em consideração o risco e a

incerteza. Entretanto, em situações de dependências entre par de atributos, este método apresenta uma desvantagem, pois é recomendado que a família de critérios seja repensada e transformada (NEIVA; GOMES, 2007).

O método AHP, também da Escola Americana, é capaz de avaliar de forma simples informações objetivas e subjetivas, envolvendo também graus de incerteza (ALVES; ALVES, 2015). O método utiliza a lógica aliada à intuição, permitindo resolver problemas com múltiplos critérios ainda que alguns se encontrem em conflito e com informação incompleta (NORRIS; MARSHALL, 1995). Contudo, algumas críticas têm surgido em relação ao AHP, como a ambiguidade na avaliação par a par inerente ao método e a sua escala limitada (MÄRKÄLÄ; JUMPPONEN, 2006). Segundo (BARD, 1992), o MAUT apresenta importantes desvantagens quando comparado ao AHP, pois o processo gera muito esforço para a coleta de dados.

A 2ª escola, a Europeia, utiliza a noção de relação de superação, possuindo duas vertentes principais: *Elimination Et Choice Translation Reality* - ELECTRE e o *Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations* - PROMÉTHÉE (ROY; BOUYSSOU, 1993). O método ELECTRE é baseado no conceito de classificação, realizando a comparação par a par de todas as alternativas para achar qual prevalece (MOTA; DE ALMEIDA, 2007; MULLER; SPILIOPOULOU; LENZ, 2002). Segundo (AYALA; FRANK, 2013), a metodologia ELECTRE sofreu diversas modificações desde sua criação, destacando que o ELECTRE III permite expressar graus de incerteza e o ELECTRE TRI utiliza conceito *fuzzy* na entrada de dados.

O método PROMÉTHÉE, foi desenvolvido por (BRANS; VINCKE; MARESCHAL, 1986) numa tentativa de resolver as deficiências do método ELECTRE (MULLER; SPILIOPOULOU; LENZ, 2002). Ele se adapta bem a problemas onde um número finito de ações alternativas deve ser ranqueado, considerando vários critérios (GOUMAS; LYGEROU, 2000). No entanto, o método não contempla a possibilidade de resolução de problemas que apresentem critérios inteiramente dependentes entre si (BORGES, 2019). Segundo (AYALA; FRANK, 2013), o PROMÉTHÉE foi modificado diversas vezes desde sua criação. As principais adições são: componentes estocásticos, representação visual dos resultados e a possibilidade de incluir imprecisão nos dados de entrada com o *fuzzy* (COSTA

e TEIXEIRA, 2006; GOUMAS e LYGEROU, 2000).

O *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique - MACBETH* é um método interativo que mede o grau de preferência do tomador de decisão sobre um conjunto de alternativas e ajuda-lhe a quantificar a atratividade relativa de cada uma delas, transformando avaliações qualitativas em quantitativas (BANA; CHAGAS, 2002). Em situações de inconsistência, permite ao decisor conhecer em quais julgamentos se encontra (JANSEN; SHIMIZU; JANSEN, 2004; MELLO; GOMES; LINS, 2001). Além disso, também possibilita realizar uma análise de sensibilidade e robustez dos dados, (BANA; CHAGAS, 2002), fazendo com que problemas complexos possam ser tratados e aplicados (SCHMIDT, 1995). Segundo (RIETKÖTTER, 2014), MACBETH baseia-se numa escala semântica e programação linear, fato que pode gerar limitações para análise de variáveis quantitativas e sistemas com muitas variáveis.

Os métodos que se utilizam da **Lógica Fuzzy** têm sido usados no contexto de substituir os métodos tradicionais que não consideram incertezas (AFRINALDI; ZHANG, 2014; EGILMEZ et al., 2016). Em exemplos aplicados para LCE, têm sido utilizada em combinação com métodos multicritérios, propiciando lidar com a incerteza (MARANDUBA et al., 2017) ou para utilização de inferência (AFRINALDI; ZHANG, 2014). Em estudos de confiabilidade, também é usada com o objetivo de tratar e quantificar variáveis subjetivas para serem tratadas em uma rede Bayesiana (YADAV et al., 2003). Contudo, segundo (GÜRSEL, 2016), é difícil desenvolver um modelo utilizando o sistema *fuzzy*.

As **Redes Bayesianas** (RB), segundo (PEARL, 2003), são modelos probabilísticos baseados em grafos acíclicos direcionados com capacidade de fazer inferências bidirecionais, capturar a dependência entre variáveis e lidar com incerteza (HOSSEINI; IVANOV, 2020; LI et al., 2018). As RB foram estruturadas a partir do teorema de Bayes para calcular a propagação da rede e considera que se a probabilidade do nó inicial (variável) e a probabilidade condicional entre todos os nós forem determinadas, então o estado de distribuição de todos os nós da rede pode ser quantificado (YANG et al., 2019).

A Figura 5, ilustra uma RB que descreve as relações causais entre as variáveis

estação do ano ( $X_1$ ), se está chovendo ( $X_2$ ), se o aspersor está ligado ( $X_3$ ), se o pavimento está molhado ( $X_4$ ) e se o pavimento é escorregadio ( $X_5$ ). No exemplo, a não existência de ligação entre  $X_1$  e  $X_5$ , por exemplo, indica que não há influência direta entre estes nós (PEARL, 2003).

Outro aspecto fundamental para o entendimento e construção das RB é a independência condicional. Conceitualmente, afirma-se que as variáveis A e C são independentes dado B, se  $P(A | B) = P(A | B, C)$ . Desta forma, considerando as RB, certas variáveis se tornarão condicionalmente independentes umas das outras dependendo da evidência, ou seja, elas irão variar independentemente, dadas certas evidências (SANDIFORD, 2012).

Ainda considerando a Figura 5, as variáveis chuva ( $X_2$ ) e aspersor ( $X_3$ ) são definidas como condicionalmente independentes, pois está omitida a conexão direta entre as mesmas (SANDIFORD, 2012). Observa-se que, pelo exemplo, esta é uma premissa do modelo proposto pelo autor, pois, em outra concepção, poderia-se considerar que a existência ou não de chuva ( $X_2$ ) exerce influência direta na variável ou nó aspersor ( $X_3$ ).

Portanto, o uso de independências para simplificar o modelo gráfico é um princípio geral que leva a representações simples e eficientes de distribuições de probabilidade conjuntas (GENIE, 2020). Esta estratégia é importante, pois quando existem muitas causas potenciais para um determinado efeito a avaliação de probabilidade, usando as RB, pode ser difícil (HECKERMAN; BREESE, 1996).

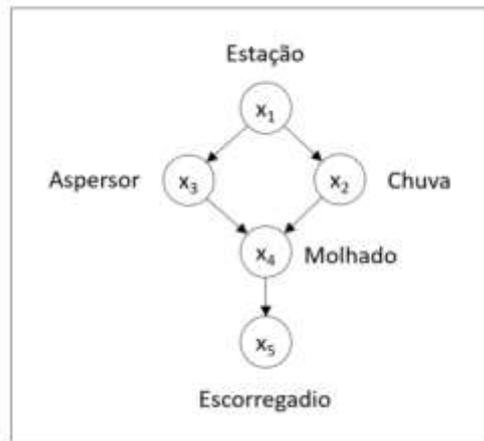


Figura 5 Exemplo de Rede Bayesiana.

Fonte: Adaptado de (PEARL, 2003).

As RB podem ser caracterizadas por possuir variáveis discretas ou contínuas, já os modelos híbridos agregam variáveis contínuas e discretas (MARQUEZ; NEIL; FENTON, 2010). As RB dinâmicas são caracterizadas por modelos que são dependentes do tempo (SANDIFORD, 2012). Segundo (BARRETO, 2006), as distribuições de probabilidade condicionais, que representam o conhecimento adquirido do especialista ou dos dados, devem ser registradas por meio de algum teorema ou corolário matemático e isso tem sido obtido satisfatoriamente pelo Teorema de Bayes que pode ser representado pela equação (1) (YANG et al., 2019). A mesma descreve a probabilidade condicional de um evento A, dado que outro evento B já tenha ocorrido anteriormente:

$$P(X_2 | X_1) = \frac{P(X_1 | X_2) \cdot P(X_2)}{P(X_1)} \quad (1),$$

onde:  $X_2, X_1$  são eventos

$P(X_2 | X_1)$ , probabilidade de  $X_2$  dado  $X_1$  é verdadeira,

$P(X_1 | X_2)$ , probabilidade de  $X_1$  dado  $X_2$  é verdadeira e

$P(X_2)$  e  $P(X_1)$  são as probabilidades independentes de  $X_2$  e  $X_1$ .

A partir dos conceitos apresentados e baseando-se na Figura 5 e na Equação (1), uma Rede Bayesiana pode ser vista como uma representação compacta de uma conjunção ou distribuições conjuntas de probabilidade de um conjunto de variáveis aleatórias ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ), conforme Equação (2):

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | P_a(X_i)) \quad (3) \quad (\text{LI et al., 2018; PEARL, 2003}) \quad (2)$$

Segundo (MATURANA, 2010), as RB são uma opção para facilitar a representação de muitas variáveis de forma intuitiva, permitir aplicações dinâmicas, utilizar variáveis discretas e contínuas (SANDIFORD, 2012), além de auxiliar em seleção de opções em PDP (LI et al., 2018) e análise de cenários (CINAR; KAYAKUTLU, 2010; DAIM et al., 2014). Contudo, autores apontam algumas desvantagens no seu uso: nos casos em que as regras de decisão precisam ser derivadas da RB, a técnica parecia ser um tanto limitada e, em segundo lugar, a interpretação das regras pode ser um problema (JANSSENS et al., 2006).

A partir das análises apresentadas anteriormente foi elaborada a Tabela 1 que compara cada um dos métodos avaliados. Embora, seja evidente que a Lógica *Fuzzy* atenda todos os critérios descritos, neste trabalho será adotada a metodologia das **RB**, pois além de atender todos os requisitos para a situação da presente tese, possui: um processo mais interativo de construção, maior flexibilidade de aplicação em futuros estudos, possibilidade de realizar maior número de simulações de forma mais simples, além de ser visualmente mais compreensível.

Tabela 1 Métodos de tomada de decisão.

	AHP	Electre	Prométhée	MAUT	Macbeth	ANP	Redes Bayesianas	Lógica Fuzzy
<b>Entrada de dados (Inputs)</b>								
Dados qualitativos e quantitativos	+	+	+	+	+	+	+	+
Critérios dependentes	-	-	-	-	-	+	+	+
Lidar com incerteza	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+	+
Variáveis não determinísticas	-	-	-	-	-	-	+	+
Modelos probabilísticos	-	-	-	-	-	-	+	+
<b>Saída de dados (Outputs)</b>								
Ranking de alternativas	+	+	+	+	+	+	+	+
Avaliação de cenários	+	-	-	+	+	+	+	+
<b>Interface do decisor versus método</b>								
Software gratuito	+	+	+	+	+	+	+	+
Publicações científicas	+	+/-	-	+/-	+	+	+	+
Aplicado a futuros estudos	+	-	-	-	-	-	+	+/-

Fonte: Adaptado de (GOLHATH et al., 2007)

### 2.3. LIFE CYCLE ENGINEERING – LCE

O *LCE – Life Cycle Engineering* é uma disciplina científica que vem se estabelecendo de maneira consolidada para o tema da sustentabilidade (PEÇAS et al., 2016). Ela envolve a compreensão e quantificação de uma série de variáveis distintas e inter-relacionadas, como: ambiental, social e de custo (TEGELTIJA et al., 2018; WANYAMA et al., 2003).

A sua perspectiva de análise é no longo prazo e normalmente é usada em desenvolvimento de produtos, seleção do tipo de tecnologia, avaliação do nível de sustentabilidade, estabelecimento de estratégias corporativas, estudos de cadeias de suprimentos e de sistemas de manufatura (OUDE LUTTIKHUIS; TOXOPEUS; LUTTERS, 2015).

A sua abordagem é naturalmente interdisciplinar, contemplando todo o ciclo de vida de produtos, serviços e processos (ALBERS; MEBOLDT, 2007). A Figura 6 mostra que a partir das interações existentes entre os clientes, competidores e produtores, que representam o mercado, podem ser identificadas oportunidades. Estas podem se tornar ideias que seguem seu desenvolvimento até serem produtos lançados no mercado. A partir daí alcançam a sua obsolescência, podendo, ainda, serem reciclados e revitalizados.

Todo este ciclo de vida, conforme a Figura 6, não segue de forma linear, isto é, ocorrem interações e iterações ao longo do seu ciclo de vida, indicando que o processo pode retornar, por exemplo, de uma fase de validação para a fase de conceito para melhor robustecer a sua proposta.

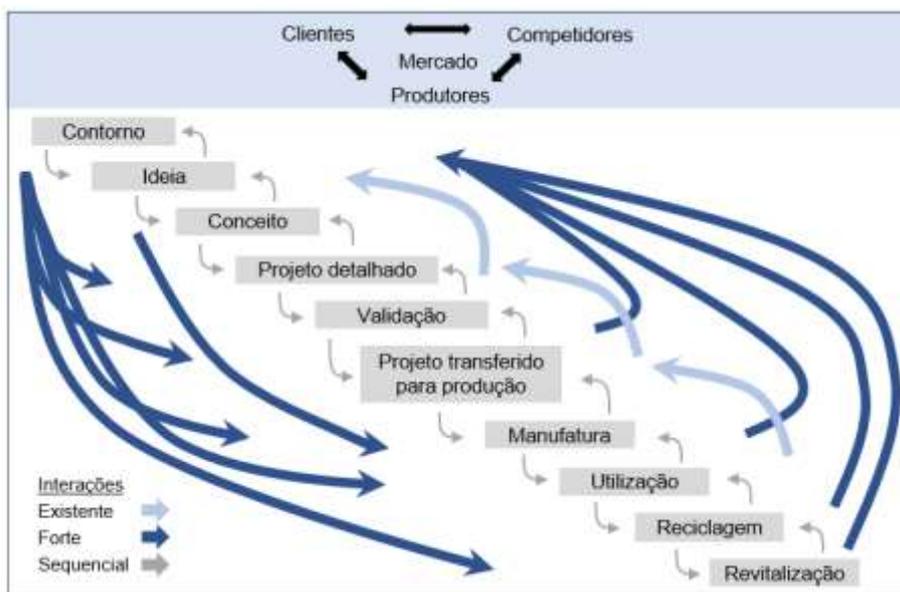


Figura 6 Estágios do ciclo de vida do produto.

Fonte: Adaptado de (ALBERS; MEBOLDT, 2007).

Na literatura, existem distintas metodologias e frameworks para abordagem do LCE. As metodologias mais conhecidas são a *Life Cycle Assessment* – LCA, que é aplicada para análise ambiental e a *Life Cycle Costing* – LCC para a variável de custo (CHOU, 2014; EPA, 2002; FISCHER, 2014; HAUSCHILD; HERRMANN; KARA, 2017; OUDE LUTTIKHUIS; TOXOPEUS; LUTTERS, 2015; PEÇAS et al., 2016; SPATARI et al., 2001; WANYAMA et al., 2003).

A Figura 7, sintetiza o modelo não integrado da versão atual da LCE, que destaca os seus métodos, ferramentas e exemplos de variáveis associados aos mesmos. O LCA considera as variáveis ambientais e emprega as ferramentas descritas na ISO14040/44 (FAVI; CAMPI; GERMANI, 2019). O LCC leva em conta as questões de custo e considera o fluxo de caixa envolvido no projeto do produto (DHILLON, 2010). Por sua vez, o *Social Life Cycle* - SLC refere-se ao domínio dos impactos sociais, tomando como base as informações sobre saúde e segurança, assim como as convenções de trabalho (JØRGENSEN et al., 2008).

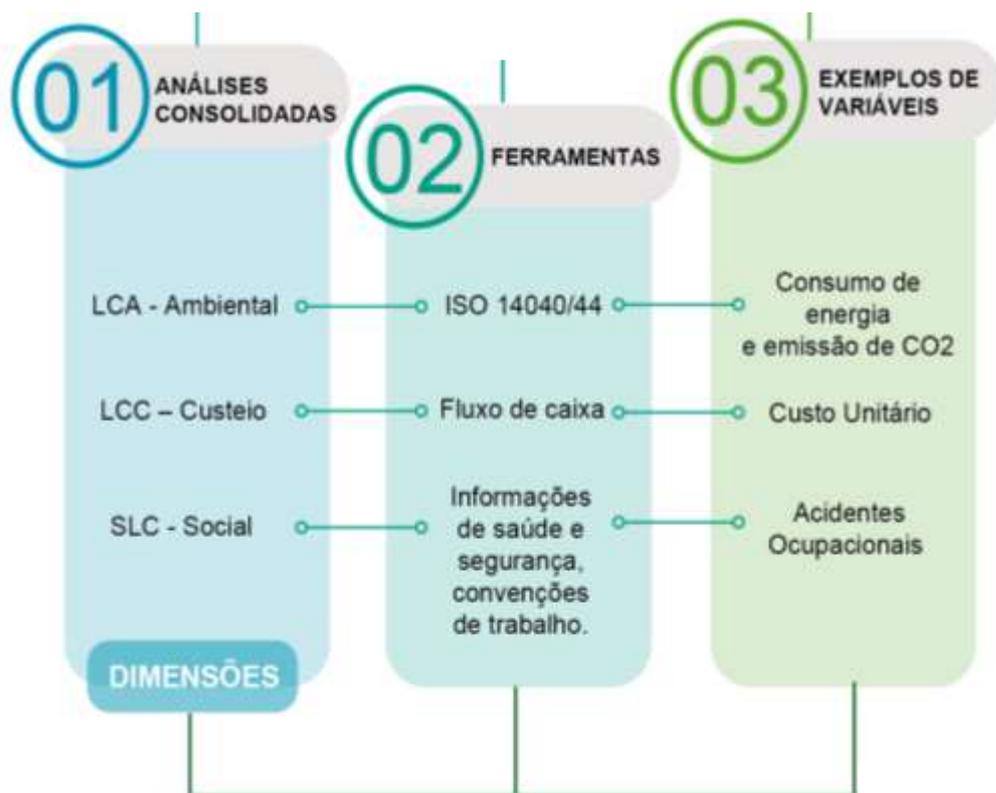


Figura 7 Estrutura atual da LCE.

Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA et al., 2021).

Conceitualmente, alguns autores consideram que o tema da LCE ainda requer consolidação, tornando-se não ambíguo, destacando as diferentes abordagens e quantificações (HERVA; ROCA, 2012; MAURICIO-MORENO et al., 2015; OUDE LUTTIKHUIS; TOXOPEUS; LUTTERS, 2015; SARTORI; LATRÔNICO; CAMPOS, 2011; YANG; YU; SEKHARI, 2011). Apesar de existirem estudos voltados para a demanda dos negócios, como estudos para redução de peso de componentes na indústria automobilística (KALUZA et al., 2017; KLOCKE et al., 2014), alguns autores ressaltam a existência de uma lacuna de orientar a análise da LCE para o negócio, como, por exemplo, o estabelecimento de metas de custo (GÖTZE et al., 2017).

É notório que uma das principais funções da LCE é contribuir no processo de tomada de decisão, particularmente em estágios iniciais de desenvolvimentos (BETZ; SCHUCKERT; HERRMANN, 1998; KALUZA et al., 2016; PECAS; RIBEIRO; HENRIQUES, 2013). Contudo, (HALOG; MANIK, 2011) criticam este tipo de abordagem metodológica reducionista, que são caracterizadas por lidar

com questões complexas, desagregando-as em partes menores gerenciáveis, mas muitas vezes elas se tornam bastante simplificadas. Entretanto, alguns autores começam a destacar que novos métodos têm sido desenvolvidos, permitindo uma investigação amparada nos conceitos de sistemas complexos (EGILMEZ et al., 2016; HERRMANN et al., 2014).

Atualmente, para a dimensão **ambiental**, a LCA se destaca como uma metodologia aplicada tanto em pesquisa, quanto em consultorias e desenvolvimento de produtos. A sua aplicação viabiliza o pensamento de alongar o ciclo de vida de produto através de estudos de reciclagem (THOMA; ELLSWORTH; YAN, 2018). Contudo, a complexidade dos softwares utilizados requer muitas interações ou simplificações, reduzindo o seu uso (CERDAS; THIEDE; HERRMANN, 2018).

(LANDIS; THEIS, 2008) destacam que as metodologias TRACIS, CML e IMPACT2002+ são úteis para mensurar as variáveis da LCA e são mais valiosas para fins comparativos entre diferentes produtos ou processos. A partir destas metodologias, ferramentas computacionais como GaBi (ORMAZAL, MARTA JACA, CARMEN PUGA-LEAL, 2014), The Simapro 7 LCA (DUFLOU et al., 2009), SimaPro e OpenLCA (QIN; CUCURACHI; SUH, 2020) foram desenvolvidas para aplicações reais.

Segundo (MORBIDONI; FAVI; GERMANI, 2011), o GaBi é uma ferramenta para a avaliação de sustentabilidade de produtos e processos e é considerado estado da arte para estudos desta natureza (HISCHIER et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2019). O GaBi contempla duas das metodologias acima citadas: a *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts* – TRACI desenvolvida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (BARE et al., 2003) e pela CML do Centro de Estudos Ambientais da Universidade de Leiden (OJOAWO; GBADAMOSI, 2013).

Entretanto, (POHL et al., 1996) ressaltam que os métodos de mensuração das variáveis do LCA carregam muita incerteza e imprecisão. Já (QIN; CUCURACHI; SUH, 2020) observam um avanço do tema, mas ainda sugerem aprofundamento. Neste sentido, o estudo de (GUO; MURPHY, 2012) incluiu a incerteza na mensuração dos resultados, estabelecendo alguns padrões de referência no

estudo de LCA para estimação de mínimos e máximos, a partir de uma distribuição.

Já em relação a dimensão **social**, considera-se que ainda requer indicadores e métodos mais robustos para análise (FINKBEINER et al., 2010). Autores propõem integração aos modelos existentes do LCA, sugerindo uma série de indicadores que poderiam ser utilizados, como os relativos à saúde e à segurança do trabalhador; oportunidades iguais; benefícios sociais; quantidade de horas trabalhadas; dentre outros (EKENER PETERSEN; EKENER-PETERSEN, 2013; HAUSCHILD; DREYER; JØRGENSEN, 2008; ZAMAGNI et al., 2015). Outros autores afirmam que, comparado com o LCA, o nível de desenvolvimento, aplicação e harmonização do SLC ainda está em um estágio preliminar (GNANSOUNOU; ALVES, 2019).

Outra importante perspectiva atual está relacionada com a pandemia causada pela COVID-19 e que tem impactado de forma significativa a sociedade, a saúde pública e as economias dos países (BARBIER; BURGESS, 2020), além de causar centenas de milhares de mortes globalmente (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2020). Estas graves consequências levaram (HAKOVIRTA; DENUWARA, 2020) a proporem uma ampliação do conceito da sustentabilidade, incluindo de forma mais clara a saúde humana.

Além dos aspectos pontuais destacados anteriormente, a análise da taxonomia consolidada por (PEÇAS et al., 2016) permite identificar outras oportunidades de avanço em relação ao modelo atual da LCE. A Figura 8 descreve que a taxonomia da LCA está dividida em quatro camadas: tipo de contribuição pretendida, bases teóricas da LCE, atividades da LCE e objetos de referência da LCE.

Do ponto de vista de contribuição, a presente tese propõe-se em concentrar em no tópico **Ferramentas e Modelos**. Em relação às bases teóricas, observa-se que a Figura 8 indica que deve constar as teorias de gestão e as teorias das engenharias que não são adequadamente contempladas nos modelos atuais, conforme visto anteriormente. Estas duas, a serem detalhadas nos capítulos posteriores, estão intimamente relacionadas, respectivamente, com o contexto da tecnologia e da confiabilidade.

Sobre as atividades da LCE, o presente estudo discutiu os aspectos relacionados à tomada de decisão e metas, cuja Figura 8 claramente destaca a perspectiva tecnológica, mas que atualmente não é contemplada por modelos que a mensurem. E, em relação aos objetos de referência, foram contemplados os produtos em fase de desenvolvimento com o intuito de seleção ou avaliação entre alternativas, através de medidas concretas que envolverão uma visão mais holística da sustentabilidade.

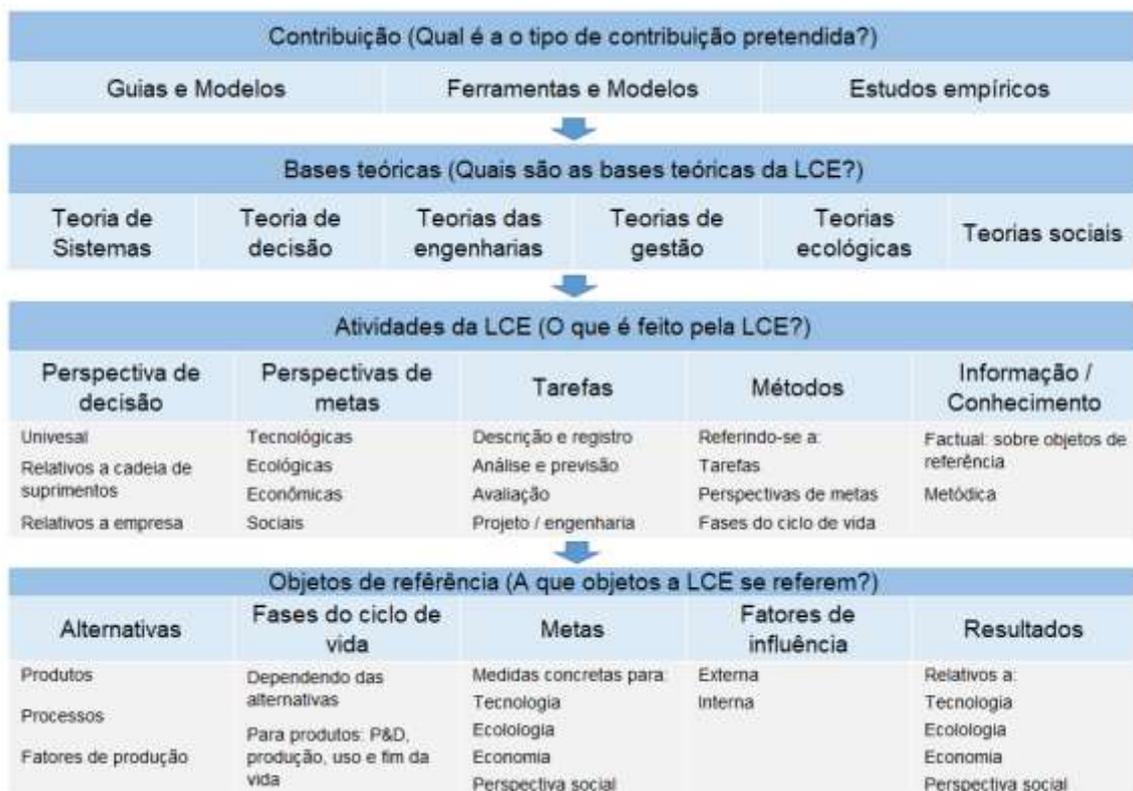


Figura 8 Taxonomia da LCE.

Fonte: Adaptado de (PEÇAS et al., 2016)

(BERGERSON et al., 2020) também destacam a importância de incluir a perspectiva da **tecnologia** aos estudos relativos à sustentabilidade, propondo um modelo que engloba a perspectiva de risco de sua inserção, seja em um contexto de mercado maduro ou não maduro. Esta contextualização do risco também aparece em outros estudos da LCE, nos quais os autores sugerem a utilização de modelos robustos de análise com o suporte de modelos probabilísticos (TEGELTIJA et al., 2018).

Outra lacuna que se apresenta nos estudos da LCE está relacionada à inserção da dimensão da **confiabilidade**. A falta de confiabilidade de produtos e sistemas representados pela ocorrência de falhas podem levar a impactos ambientais e econômicos, como sugerem (LEIMEISTER; KOLIOS, 2018) em um estudo de confiabilidade aplicada a parques eólicos off-shore.

A integração da confiabilidade e o estudo da LCE tem demonstrado ser um fator relevante na estratégia de longo prazo de produtos de longa duração (VEIT-EGERER et al., 2017), apesar do mesmo ter sido aplicado em fase de manutenção. Já (SÁNCHEZ-SILVA; KLUTKE, 2016) ressalta a importância de estudos combinados de ciclo de vida e de confiabilidade como forma de garantir a segurança destes projetos sujeitos a degradação.

Como visto, a LCE é uma disciplina importante, principalmente em fases iniciais de projeto. Atualmente, o seu estudo engloba as dimensões custo, social e ambiental, contudo ainda possui algumas lacunas, como a integração da análise, maior aprofundamento nas técnicas de tomada de decisão, além da necessidade de inclusão das dimensões da tecnologia e à confiabilidade.

Os capítulos a seguir abordam o estado da arte referentes à tecnologia e à confiabilidade. A partir desse momento foi proposto integrar estas dimensões aos estudos da LCE por meio de modelos que as suportem no processo decisório em fases iniciais de desenvolvimento de produto ou tecnologia.

## 2.4. TECNOLOGIA

Este capítulo destaca a importância da incorporação da dimensão da tecnologia na análise da LCE. Neste sentido, um estudo ressaltou a importância da integração do estudo da sustentabilidade com o da maturidade tecnológica em fases iniciais de PDP ou no desenvolvimento da tecnologia (HALLSTEDT; PIGOSSO, 2017). Nesta perspectiva da LCE, uma tecnologia com baixa maturidade técnica pode não ser capaz de desempenhar uma função crítica esperada (ABNT, 2015), por outro lado, uma tecnologia já em decadência pode resultar em um risco de falta de componentes para realização de manutenção (VALERDI; KOHL, 2004).

Convém salientar que a literatura aborda o contexto da tecnologia a partir de diferentes pontos de vista. Pela **perspectiva técnica**, usualmente, utiliza-se o conceito de maturidade, que está associada ao seu nível de prontidão, medido por meio do *Technology Readiness Level* (TRL), desenvolvido pela NASA e que vem sendo utilizado pela indústria aeroespacial (ABNT, 2015; NASA, 2007). Na indústria de petróleo offshore, por outro lado, é utilizada a norma API17N (YASSERI, 2013). O seu conceito estabelece que “em cada um destes estágios, a tecnologia apresenta diferentes graus de incerteza e risco, que devem ser progressivamente reduzidos para que o sistema apresente as funcionalidades e desempenhos, alinhados a níveis de exposição à falhas, acordados com suas partes interessadas” (ANDRADE et al., 2019).

Alguns autores criticam esta escala, seja por sua subjetividade (AZIZIAN; SARKANI; MAZZUCHI, 2009), ou por ela não representar bem a integração de componentes em um sistema complexo, que pode mensurada pela *Integration Readiness Levels* (IRL), normalmente utilizando matrizes (JESUS; JR., 2018). Já o *System Readiness Level* - SRL foi desenvolvido para avaliar o risco de desenvolvimento de todo o sistema e, matematicamente, combinar os valores de TRL e IRL de componentes, criando uma medida do progresso técnico do sistema (SAUSER et al., 2006).

Uma outra escala é o *Manufacturing Readiness Level* – MRL, que tem o seu histórico de desenvolvimento associado ao Departamento de Defesa dos Estados Unidos, tendo como foco o processo produtivo (WARD et al., 2018). Outros autores propõem incorporar uma visão mais ampla por meio conceito de *System Readiness Level Plus* – SRL+, que engloba o TRL, IRL e o MRL, criando uma modelagem matemática que abrange o componente, o sistema e o processo produtivo (MARLYANA; TONTOWI; YUNIARTO, 2018).

As metodologias descritas têm como foco a inserção do produto no **mercado**, mas falham em não colocar variáveis relativas ao próprio mercado. Neste sentido, alguns autores têm proposto abordar esta questão de forma mais holística, incluindo outras variáveis: propriedade intelectual, consumidor, mercado e sociedade (DARMANI; JULLIEN, 2017). Em outro estudo, é incluída a visão do cliente e da sociedade, respectivamente: *Customer Readiness Level* – CRL e *Societal Readiness Level* – SRL (MUNIR et al., 2018). (WARD et al.,

2018) fazem uma revisão de diversos estudos e propõem o uso de três critérios para estudar o assunto: maturidade da tecnologia (TRL), da cadeia de suprimentos e da aplicação produto no seu ciclo de vida.

Conforme visto, conceitos como TRL e MRL já se fazem presentes em processos de avaliação do nível de prontidão da tecnologia, contudo a avaliação da tecnologia sob a perspectiva do mercado ainda pode evoluir. A partir dos estudos de (MUNIR et al., 2018) e (DARMANI; JULLIEN, 2017), estas análises podem ser ampliadas e integradas à visão técnica existente. Desta forma, uma visão mais ampla para apoiar os tomadores de decisão em processos de desenvolvimento de produto ou seleção de tecnologia pode ser implantada (ENGEL et al., 2012). Estas perspectivas, além das mencionadas, poderiam incluir um panorama mais amplo de competitividade de mercado como: escalonamento do negócio, competitividade em custo e o risco de substituição por outra tecnologia emergente ou em evolução.

Para este contexto mais amplo de competitividade e de mercado, as **Cinco Forças de Porter**, representado pela Figura 9 é considerado um dos modelos mais influentes nas escolas de negócios (GRUNDY, 2006). No referido modelo, (ANDRADE; JUNIOR; SILVA, 2019) destacam que a tecnologia é um dos fatores que podem alterar as forças da arena competitiva e as capacitações das empresas. Esta visão pode ser útil para a construção e modelagem, pois poderia dar uma nova perspectiva ao modelo de Porter que atualmente aborda apenas uma visão conceitual.

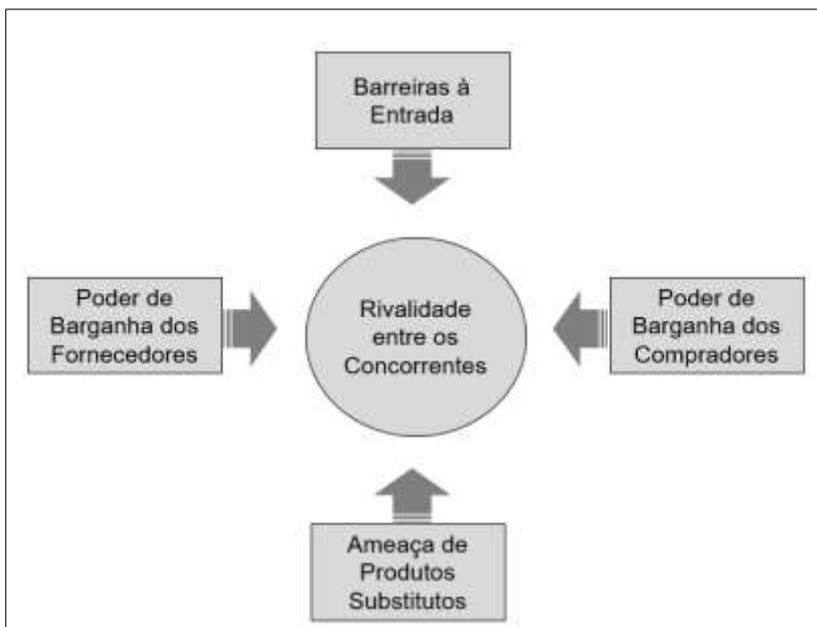


Figura 9 Cinco Forças que moldam a competição.

Fonte: Adaptado de (PORTER, 1996)

No contexto da tecnologia, os estudos e metodologias descritos acima não contemplam a etapa da obsolescência da mesma. Nesta etapa, o risco de substituição e aumento exagerado de custos relativos a sua operação tendem a subir (CHESTNUTWOOD; LEVIN, 1999). Esta lacuna remete a uma outra perspectiva que é fundamental para o estudo de uma determinada tecnologia, isto é: o ciclo de vida da tecnologia ou *Technology Life Cycle* – TLC que será abordado a seguir.

O conceito de **ciclo de vida da tecnologia ou TLC**, também chamado de curva S, é graficamente apresentado na Figura 10 e baseia-se em estudo referente a gestão estratégica da tecnologia (LITTLE, 1981). A curva S descreve as fases de maturidade de determinada tecnologia, a saber: emergente, crescimento, maturidade e saturação (GAO et al., 2013).

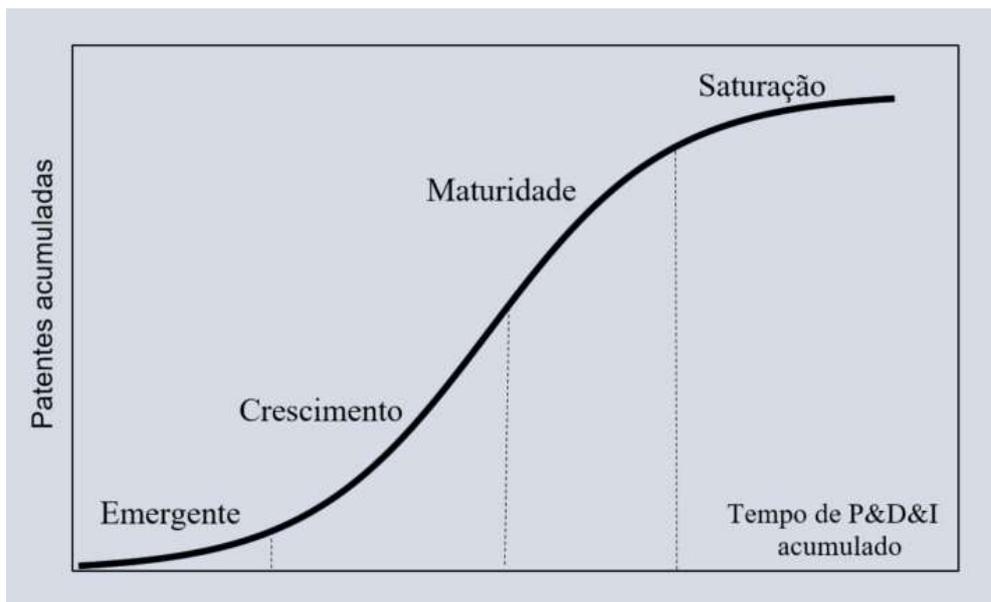


Figura 10 Curva S no conceito do ciclo de vida da tecnologia.

Fonte: Adaptado de (GAO et al., 2013).

O estudo da curva S pode ser utilizado no monitoramento da estratégia, na seleção de investimento e na identificação do estágio de uma determinada tecnologia (ZARTHA et al., 2017). As suas curvas teóricas podem ser matematicamente expressas pela equação (3), na qual os coeficientes  $a$  e  $b$ , correspondem respectivamente à locação e ao formato da curva e  $L$  é o valor máximo da assíntota do eixo  $Y$  (MADVAR et al., 2016):

$$Y_t = \frac{L}{1+ae^{-bt}} \quad (3)$$

A sua construção se dá a partir do levantamento do número de patentes publicadas, de uma determinada tecnologia, e por dados acumulados ano a ano (GAO et al., 2013). Convém salientar que o estudo das patentes tem uma longa história na comunidade científica, como abordagens econômicas e de mercado (DOSI, 1982; PAVITT, 1984), passando por uma mensuração da mudança tecnológica e sua relação com o processo de inovação (BASBERG, 1987) ou até mesmo mensurando a capacidade de inovação de um país através do *Global Innovation Index - GII* (INSEAD, 2007; WIPO; INSEAD; CORNELL, 2019).

Na perspectiva econômica, destaca a importância das patentes como dimensão relevante para a avaliação da trajetória de uma tecnologia e sua inserção no mercado (DOSI, 1982; PAVITT, 1984). (BASBERG, 1987) realizou um trabalho

de revisão de literatura que, de diferentes maneiras, utiliza dados de patentes como fonte de informação para medir mudanças tecnológicas. Segundo (YANG; YU; LIU, 2018), a análise de patentes é uma abordagem robusta que tem sido amplamente utilizada para identificar tecnologias concorrentes e criar estratégias para o futuro em determinado campo tecnológico alvo.

Outro conceito também difundido é o da *Technology Forecasting*, que alguns autores abordam como um processo de previsão tecnológica (CHO; JEONG; KIM, 1991). Estes conceitos estão inter-relacionados, pois buscam compreender e prever o ciclo de vida de uma determinada tecnologia (CASCINI et al., 2015; DAIM et al., 2006; JAMALI et al., 2016; KYEBAMBE et al., 2017; MARTINO, 1993; WILDER et al., 2016). Convém salientar que o conceito de *Technology Forecasting* muitas vezes é utilizado em outro contexto, o da difusão de uma determinada tecnologia em um mercado (CHO; DAIM, 2016), cujo enfoque não está relacionado com o presente estudo.

Do ponto de vista da construção matemática e ajustes à curva S, o estudo recente questiona os métodos determinísticos, propondo uma análise de ciclo de vida de tecnologia estocástica para rastrear as fases da progressão de uma tecnologia com base em citações de patente e identificar os padrões de ciclos de vida de tecnologia (LEE et al., 2017). É conveniente ressaltar que estudos não tão recentes também questionam estes modelos, propondo uma visão estocástica ou probabilística (MURTHY, 1979). (FYE et al., 2013) realizaram mais de 300 avaliações de predição de tecnologia e concluíram que os métodos quantitativos produzem previsões mais precisas, principalmente quando combinam com a opinião de especialistas.

Contudo, alguns estudos ainda continuam com análises conceituais em relação à curva s (HAUPT; KLOYER; LANGE, 2007; JAMALI et al., 2016; TRAPPEY et al., 2011; YANG; YU; LIU, 2018). Enquanto outros, buscam criar visões mais quantitativas, identificando os pontos de inflexão da referida curva ou do estágio da tecnologia (CHANG; FAN, 2016; CHEN; CHEN; LEE, 2011; PETER; SWILLING, 2014; WILDER et al., 2016). De forma geral, o TLC provou ser um modelo essencial para compreender o estado de maturidade tecnológica (ARDILIO; WARSCHAT; SPATH, 2012).

A análise de patentes, utilizando a curva S, também foi aplicada no segmento de Óleo & Gás para avaliar a dinâmica das patentes de tecnologias de injeção de CO<sub>2</sub>. A partir de uma adaptação visual, criou uma projeção de que a tecnologias estariam saturadas entre 2040 e 2050, mas sem utilizar nenhuma ferramenta matemática (MADVAR et al., 2016). Isso pode se caracterizar por uma lacuna de pesquisa, pois, segundo (SMITH; AGRAWAL, 2014), a modelagem matemática para elaboração e projeção da Curva S é de suma importância para realização das análises, e considera que o uso de séries temporais com modernas técnicas de amortecimentos como possível solução.

Como visto, diversas abordagens em relação à tecnologia existem e, recentemente vem sendo aplicadas de forma mais integrada e holística. Desta forma, foi elaborada uma análise das diferentes abordagens da tecnologia que é apresentada na Tabela 2, onde tem-se o resumo destas diversas abordagens e síntese dos seus respectivos pontos positivos e negativos.

Tabela 2 Quadro de metodologias da avaliação da tecnologia.

Modelo	Abordagem	Aspectos Positivos	Aspectos negativos
<i>Technology Readiness Level</i> (TRL)	A maturidade está associada ao seu nível de prontidão técnica (NASA, 2007).	Ser normatizado e reconhecida pela indústria (ABNT, 2015)	Subjetividade e se restringir ao aspecto técnico. Não contempla a análise da obsolescência da tecnologia.
<i>Integration Readiness Levels</i> (IRL)	Integração de componentes em um sistema complexo.	Avaliar a integração de componentes em um sistema.	Se restringir à visão técnica.
<i>System Readiness Level – SRL</i> (SAUSER et al., 2006)	Avaliação do risco do sistema, combinando o TRL com o IRL de componentes.	Combinando a prontidão do componente e a integração do mesmo.	Restrito ao aspecto técnico. Não contempla a análise da obsolescência da tecnologia.
<i>Manufacturing Readiness Level – MRL</i>	Avaliação da maturidade da manufatura	Avaliar a manufatura.	Avaliar apenas o aspecto técnico.
<i>System Readiness Level Plus – SRL+</i> (MARLYANA; TONTOWI; YUNIARTO, 2018)	Engloba os conceitos de TRL, IRL e o MRL.	Avaliar os aspectos técnicos numa visão mais global.	Restrito aos aspectos técnicos e não contempla a análise da obsolescência da tecnologia
(MUNIR et al., 2018)	Avalia o nível de prontidão do cliente (CRL) e da sociedade (SRL)	Incluir a visão do cliente e da sociedade em relação ao produto	Não aborda a questão da competitividade do mercado e os aspectos técnicos.
(WARD et al., 2018)	Engloba o TRL, a cadeia de suprimentos e da	Abordagem que integra a visão técnica com a cadeia	Não incluir a visão do mercado, da manufatura e da

	aplicação produto no seu ciclo e vida	de suprimentos e o ciclo de vida do produto.	competitividade do mercado.
(DARMANI; JULLIEN, 2017)	Engloba as dimensões: propriedade intelectual, consumidor, mercado e sociedade	Avaliar os aspectos mais externos do mercado.	Não avaliar os aspectos técnicos, nem obsolescência da tecnologia.
Technology life cycle (TLC)	Avalia a maturidade da tecnologia em seu ciclo de vida	Avaliar o risco da manufatura no seu ciclo de vida. Buscar antecipar tendências.	Requer a opinião de especialistas. Não analisa a perspectiva técnica, nem da manufatura. Não está aplicada a LCE.

Fonte: Elaboração própria (2020).

Além da perspectiva de integração da avaliação anteriormente descrita, especificamente para **TLC** algumas oportunidades podem ser listadas tomando como base o contexto deste trabalho:

- Em se tratando de modelagem matemática, ainda há espaço para melhorias, como a identificação de pontos de transição entre as etapas na curva. Alguns estudos buscam identificar esses pontos, apesar de serem a partir de uma abordagem empírica (ANDRADE et al., 2019) ou usando modelagem para identificar apenas o ponto central de inflexão (WILDER et al., 2016), ou, ainda restritos a um único modelo de curva de crescimento (KUCHARAVY; DE GUIO, 2011; XIUXU et al., 2015).
- É possível utilizar técnicas avançadas de amortecimentos e previsão como curvas de crescimento (CAGLAR; TEUFEL; WILKE, 2018; DE GOOIJER; HYNDMAN, 1982; GOSHU, 2013; KABACOFF, 2011; SUBHASREE CHATTERJEE, 2018; WILDER et al., 2016; XIN'AN; AIJUN, 2016).

## 2.5. CONFIABILIDADE

O mercado caracteriza-se por sua competitividade e pela alta exigência dos clientes em relação à confiabilidade (LU et al., 1999) e à baixa tolerância a produtos defeituosos (AZARKHAIL; MODARRES, 2012). Ao mesmo tempo, com a consolidação do papel da sustentabilidade, mudanças nos critérios de

alocação de portfólio passam a excluir empresas que representem maior risco à sustentabilidade alterando os processos decisórios nas finanças globais (FINK, 2020).

Esta conjuntura, naturalmente, leva à discussão do papel das empresas e da inovação na transição para sustentabilidade (FAGERBERG, 2018). Por outro lado, leva a um paradoxo, pois se quer lançar produtos em um menor tempo com maior confiabilidade, porém sem se beneficiar de longos testes, portanto, dados que poderiam ser preciosos para robustecer modelos (MAZZUCHI; SOYER, 2003).

Sob a perspectiva da confiabilidade e do gerenciamento de riscos, o custo extra gerado pela ausência desta gestão pode ocasionar perdas financeiras, de consumidores e da confiança dos investidores (COLEMAN; CASSELMAN, 2016; TAO et al., 2017). Também pode levar a consequências prejudiciais à segurança, à competitividade e à reputação da empresa (PAGANIN; BORSATO, 2017). Em situações extremas, sistemas de baixa confiabilidade causam impactos combinados à vida humana, ao meio ambiente e financeiros, como o trágico acidente ocorrido em 2010 com uma sonda de petróleo (DEEPWATER HORIZON STUDY GROUP, 2011).

O relatório final de investigação do acidente acima descrito recomendou a necessidade de implementação de tecnologia que criasse e mantivesse sistemas de exploração e produção de alta confiabilidade, particularmente o *blowout preventer* - BOP, que é a última linha de defesa contra problemas de controle de poço (DEEPWATER HORIZON STUDY GROUP, 2011). Já o relatório de investigação interna da empresa, no tópico referente ao projeto e garantia dos sistemas do BOP, recomendou que passassem a ter níveis mínimos de confiabilidade (BP, 2010).

Como visto no caso anterior, as dimensões de custo, impacto ambiental e nas pessoas, podem ter uma relação importante com a confiabilidade. Contudo, a versão atual da LCE, que engloba as dimensões social, de custo e ambiental (PEÇAS et al., 2016), falha em não incluir a dimensão da confiabilidade. Desta forma, o presente capítulo propõe-se a estudar os conceitos, revisar o estado da arte, além de discorrer sobre as principais técnicas probabilísticas e

metodologias da confiabilidade aplicadas ao desenvolvimento de produto, com o propósito de incorporá-la numa proposta de revisão da LCE.

A **confiabilidade** é a probabilidade, em determinado tempo, de que um componente irá desempenhar conforme previsto, sob as condições operacionais e ambientais especificadas, tendo sua função caracterizada como decrescente no tempo, em decorrência da degradação do sistema (AZARKHAIL; MODARRES, 2012).

De acordo com (O'CONNOR; KLEYNER, 2012), em ordem de prioridade, os objetivos da confiabilidade são:

- Aplicar o conhecimento de engenharia e de especialistas para prevenir ou reduzir a probabilidade ou frequência de falhas;
- Identificar e corrigir as causas das falhas que ocorrem;
- Determinar maneiras de lidar com as falhas que ocorrem, se as causas não foram corrigidas; e
- Aplicar métodos para estimar a provável confiabilidade de novos projetos e analisar dados de confiabilidade (O'CONNOR; KLEYNER, 2012).

O **risco** é o potencial do referido componente causar uma perda, sejam de outros sistemas, da saúde e segurança humana, ambiental ou econômica (MODARRES; KAMINSKIY; KRIVTSOV, 2017). As perdas levam a uma combinação de consequências indesejáveis dos cenários de falha e a probabilidade desses cenários (STAMATELATOS et al., 2011), podendo ser classificados como qualitativos ou quantitativos (DNV-GL, 2017).

Como a maioria dos mecanismos de falha de um componente, suas interações e processos de degradação não são totalmente compreendidos, a previsão de falhas envolve incerteza (MODARRES; KAMINSKIY; KRIVTSOV, 2017). As principais fontes de incerteza na avaliação e gerenciamento de riscos podem ser originárias de discordâncias referentes à interpretação de conceitos-chave; dos modos de falha, da probabilidade e magnitude de consequências; do nível de risco significativo ou aceitável; e, por fim, do valor de ações ou consequências alternativas de gerenciamento de riscos (COVELLO et al., 1987).

As incertezas podem ser categorizadas em aleatórias, vindas de variações imprevisíveis ou de fatores que influenciam no resultado, mas não podem ser controladas; e epistêmicas, geradas pela falta de informações ou da incoerência em sua obtenção (SINNWELL; SIEDLER; AURICH, 2019b). Particularmente, durante o processo de desenvolvimento de produto, a tomada de decisão sempre será baseada nas informações obtidas até o presente momento e a incerteza é decorrente da qualidade da mesma (RUNZHEIMER, 1999).

Historicamente falando, a atuação do grupo consultivo do Departamento de Defesa dos EUA entre 1956 e 1958 é considerado o ponto de inflexão da engenharia de confiabilidade (AZARKHAIL; MODARRES, 2012). Já (STAMATELATOS et al., 2011) consideram que a referência são os métodos dos programas aeroespaciais dos EUA na década de 1960 (AZARKHAIL; MODARRES, 2012). Já os anos de 1970 estão vinculados a análise de risco na construção e operação de usinas nucleares (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009), da árvore de falha e dos diagramas de blocos (*Reliability Block Diagram* - RBD), que tratam de sistemas mecânicos dependentes (AZARKHAIL; MODARRES, 2012). Já o primeiro estudo abrangente de avaliação probabilística de risco (*Probabilistic Risk Assessment* – PRA) foi associado a quantificação de riscos na operação de usinas nucleares (STAMATELATOS et al., 2011).

Nos anos de 1980, surge o conceito de causa raiz da falha e dos modelos de vida acelerada (*Accelerated Life Testing* - ALT e *Highly Accelerated Life Testing* – HALT (BIROLINI; DHILLON; BIROLINI, 2017)), que buscam representar as condições operacionais com menos dados (AZARKHAIL; MODARRES, 2012). A RB discreta tem sido uma referência para estudos de estimação de confiabilidade em fases iniciais de projeto, pois lidam bem com a incerteza (DROGUETT; MOSLEH, 2008), mas não emulam as condições operacionais, já que são variáveis contínuas (LEE; PAN, 2018). Estas limitações podem ser suplantadas com o uso de redes Bayesianas híbridas, que suportam tanto variáveis discretas quanto contínuas (MARQUEZ; NEIL; FENTON, 2010).

Os anos de 1990 testemunham a popularização das metodologias de física da falha (AZARKHAIL; MODARRES, 2012), atualmente usadas em protótipos digitais com o apoio da simulação fluidodinâmica e de elementos finitos (XUEGANG, 2015). Eles são importantes nas fases de testes, pois são capazes

de trazer fatores influentes para os estudos de componentes (AZARKHAIL; MODARRES, 2012), relacionando a dependência entre eles e o tempo (CHENG, 2017). Os modelos híbridos surgem nos anos 2000 graças ao avanço computacional e das análises de Monte Carlo (*Monte Carlo Analysis - MCA*) (AZARKHAIL; MODARRES, 2012).

Já as análises de degradação (*Degradation Analysis - DA*) são indicadas para produtos que objetivam ter valores extremos de confiabilidade, mesmo após longos períodos, já que os testes tradicionais iriam registrar apenas uma falha, dificultando a modelagem (BALAKRISHNAN et al., 2010). Normalmente, combinam o fator determinístico, representado por sistemas de equações diferenciais, associado a uma parte randômica (ou aleatória), representada por distribuições probabilísticas em função da variabilidade de cada peça produzida e das condições operacionais e ambientais (MEEKER et al., 1998).

Além das técnicas e metodologias citadas, outras ferramentas são utilizadas para suportar estudos da confiabilidade em fases conceituais de desenvolvimento de produto, como as ferramentas analíticas de risco: *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* (FMECA) e *Hazard and Operability Study* (HAZOP) (VINNEM, 2014). Já numa fase posterior, é comum ocorrer diversos testes, almejando a validação dos conceitos propostos, para que a engenharia adote as modificações necessárias até que o produto esteja pronto para ser lançado no mercado (MAZZUCHI; SOYER, 2003).

O estado da arte atual está vinculado ao uso de técnicas de aprendizagem profunda (*Deep Learning - DL*) que se tornaram-se essenciais para o *Prognostics and Health Management* (PHM), comumente usados como um algoritmo de regressão para o prognóstico do comportamento de um sistema, estimando a vida útil remanescente do mesmo, na busca de explorar a física da degradação (COFRE-MARTEL; LOPEZ DROGUETT; MODARRES, 2020).

Como visto, diversas técnicas, ferramentas e metodologias qualitativas, semiquantitativas e quantitativas para a confiabilidade, aplicadas ao contexto de PDP, foram sendo desenvolvidas e aprimoradas. Em um contexto de mercado com ciclos de vida de produtos cada vez menores (VESEY, 1992) e de que

aproximadamente 70% do custo do produto em seu ciclo de vida sendo determinado nas fases iniciais de projeto, esta etapa tem se tornado cada vez mais importante no processo decisório das empresas (SARAVI et al., 2008).

Entretanto, a escassez de dados, é uma característica comumente encontrada durante o desenvolvimento de produtos (DROGUETT; MOSLEH, 2006). Neste sentido, autores buscam enfrentar estes desafios propondo modelos que, mesmo com poucos dados, sejam capazes de estimar a confiabilidade em fases conceituas de PDP, utilizando técnicas probabilísticas e de inferência a partir de RB (LEE; PAN, 2018).

Apesar dos avanços acima apresentados, ainda ocorrem estudos superficiais relativos à confiabilidade, como o proposto por (ANDRADE; JUNIOR; SILVA, 2019), que meramente fala de modelos. Outros apontam a importância, mas desenvolvem modelo conceitual sem quantificação da confiabilidade (LU et al., 1999).

A partir do levantamento apresentado e com o objetivo de sintetizar as técnicas da confiabilidade, a Figura 11 apresenta as principais metodologias, técnicas e ferramentas que podem ser utilizadas no contexto de PDP. Em fases mais iniciais ferramentas preliminares, como FMEA podem ser aplicadas para a mensuração da confiabilidade. À medida que dados estejam disponíveis a partir de testes de ALT / HALT, modelos quantitativos podem ser aplicados, como a análise de degradação. Por fim, quando ao uso do produto, modelos de confiabilidade humana podem ser aplicados com o objetivo de minimizar o risco durante a sua operação.



Figura 11 Confiabilidade aplicada ao PDP.

Fonte: Adaptado (CHENG, 2017; DROGUETT; MOSLEH, 2006; JR, 2017; MODARRES, 2013; O'CONNOR; KLEYNER, 2012; SALES FILHO et al., 2017; YADAV et al., 2003)

Além da perspectiva das técnicas e metodologias, é essencial citar as diferentes estratégias da confiabilidade: crescimento da confiabilidade durante cada fase do projeto (*reliability growth - RG*) (NEIL et al., 2005; YE, 2016), o PDP com enfoque na confiabilidade (*design for reliability - DfR*) (CHENG, 2017; PAGANIN; BORSATO, 2017), além de estudos associados à melhoria da confiabilidade para produtos já lançados no mercado (YULING; KHAN, 2008). A Tabela 3, descreve as metodologias para estudos da confiabilidade no PDP, destacando as respectivas características, prós e contras relativos à sua aplicação.

Tabela 3 Metodologias da confiabilidade no PDP.

Metodologia	Características	Prós	Contras
Análise Bayesiana	Diversas fontes de informação: dados de campo (curvas de taxa de falha), de testes acelerados, evidência subjetiva (opinião de especialistas) e informações de desenvolvimentos anteriores.	Fontes distintas de informação e melhoria da avaliação ao longo do processo de desenvolvimento ao incluir mais dados. Leva em consideração a incerteza através das distribuições de probabilidade nos nós. Pode utilizar dados de projetos similares anteriores para mensuração.	Subjetividade e dependência da opinião do especialista, que pode ser mitigada com procedimento de julgamento. Não se adequa a sistemas muito complexos (LEE; PAN, 2018).
Abordagem Bayesiana	Utiliza metodologia Bayesiana e opinião de especialistas.	Busca determinar o número adequado de testes.	O exemplo dado é hipotético,

(MAZZUCHI; SOYER, 2003)				dificultando a avaliação do mesmo para usos reais. Não justifica a escolha do modelo de distribuição estatística.
BBN – <i>Bayesian Belief Networks</i> (NEIL et al., 2005)	Combina a teoria de probabilidade Bayesiana e a noção de independência condicional. grafo direcionado, cujos nós representam as variáveis incertas e as bordas são os elos causais entre as variáveis.	Consegue lidar com problemas de tamanho realistas, como diagnóstico de falhas sob condições de incerteza e avaliações subjetivas. Facilidade da representação visual (SUIKKI, 2006).		Dificuldade de criar a representação adequada do modelo. Depende muito do especialista para definir os valores da probabilidade condicional. Se tiver muitas combinações, torna-se inviável a solução.
<i>Design for Reliability</i> (DfR) (PAGANIN; BORSATO, 2017)	Processo que descreve todo o conjunto de ferramentas que apoia o esforço para melhorar a confiabilidade de um produto desde seu nível conceitual até sua obsolescência.	Uso de dados das mais diversas fontes e formatos.		Poucos estudos relativos ao tema. Não é um processo definido e estruturado e sim um conceito mais geral relativo ao processo da confiabilidade durante o seu ciclo de vida.
Lógica <i>fuzzy</i> (WANG; YANG, 1993)	Utiliza modelo de confiabilidade dependente em sistema dinâmico a partir da função de taxa de falha. Utiliza a teoria <i>fuzzy</i> para basear-se na opinião de especialistas.	Lidar com incerteza e envolve variáveis qualitativas e quantitativas.		Limita-se a situações em que se tem informações preliminares de outros produtos similares.
Lógica <i>fuzzy</i> associada a um <i>framework</i> Bayesiano (YADAV et al., 2003)	Estrutura formal para capturar informações e conhecimentos anteriores, combinando com novos dados a partir de uma estrutura Bayesiana para atualizar as estimativas de confiabilidade.	Indicada para sistemas eletromecânicos. Incorpora dados e informações qualitativas e quantitativas. Lida com incerteza.		Mistura duas técnicas distintas, dificultando a modelagem e análise, quando poderia utilizar diretamente a estrutura Bayesiana.

Fonte: Elaboração própria (2020)

A partir da discussão realizada e do levantamento das diversas técnicas e metodologias associadas à quantificação da confiabilidade em etapas de PDP, buscou-se elaborar um levantamento de artigos na base de dados multidisciplinar da *Web of Science* para identificar e mapear a utilização ao longo dos anos destas diversas metodologias.

Para tanto, a base de dados foi acessada em 16/08/2020, fazendo o uso de combinações de palavras-chave das técnicas que estão representadas na Figura 12, combinadas com as palavras confiabilidade e combinações relativas a desenvolvimento de produto (DERWENT INNOVATION INDEX - DII, 2020). O período de busca foi restrito aos anos de 2001 até 2019 e mostra que a técnica de Monte Carlo, as redes bayesianas (BN) e as árvores de falha são as três técnicas mais utilizadas nos últimos anos.

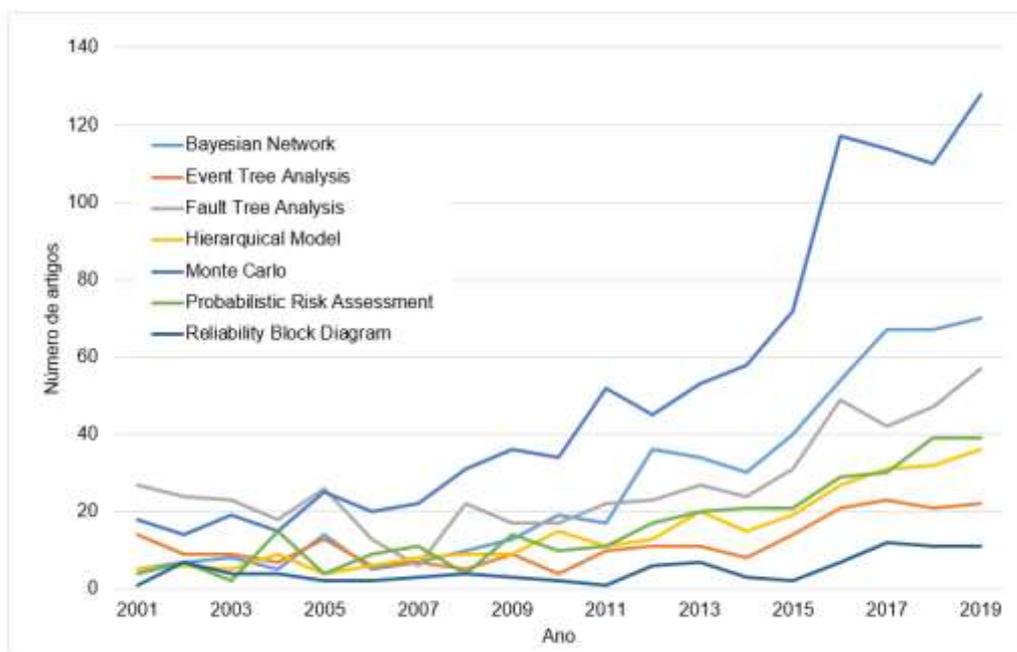


Figura 12 Artigos das ferramentas da confiabilidade.

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de (DERWENT INNOVATION INDEX - DII, 2020)

Além dos aspectos relacionados às diferentes ferramentas e às metodologias anteriormente relacionados, salienta-se que o papel da estatística e, principalmente, dos modelos probabilísticos são de grande relevância para entender o comportamento e a quantificação da falha acumulada e o tempo de vida de equipamentos (JIANG, 2015). Neste sentido, a distribuição de Weibull é a mais utilizada para problemas relativos à confiabilidade (HO; SILVA, 2005) e diversos pesquisadores têm se esforçado para criar modificações com o objetivo

de comportar outras configurações, como a da curva da banheira (ALMALKI; NADARAJAH, 2014).

Além da distribuição de Weibull, diversas outras distribuições são utilizadas, como: exponencial e gama generalizada (BIROLINI; DHILLON; BIROLINI, 2017). Outros autores usam a distribuição Dirichlet combinada com uma abordagem Bayesiana (MAZZUCHI; SOYER, 2003). Já a distribuição q-exponencial viabiliza a modelagem com valores extremamente altos e com altos ciclos (SALES FILHO et al., 2017). A Tabela 4 lista as principais distribuições de probabilidade, suas características, prós e contras, além de apresentar as funções de confiabilidade,  $R(t)$ , e taxa de falha,  $h(t)$ , das principais delas.

Tabela 4 Distribuições probabilísticas no estudo da confiabilidade.

Distribuição	Características	Prós	Contras
Exponencial (BIROLINI; DHILLON; BIROLINI, 2017)	Taxa de falha constante. Eletrônicos.	Simplicidade.	Depende das premissas iniciais, poucas aplicações. Ignora envelhecimento e degradação.
Weibull (ALMALKI; NADARAJAH, 2014)	Taxa de falha crescente ou decrescente. Sistemas mecânicos. Mais utilizada em confiabilidade.	Representa a física da falha, amplamente usada na indústria, flexibilidade.	Modela somente fenômenos com taxa de falha monótona.
	Função de taxa de falha: $h(t) = \alpha t^{\theta-1}$ , podendo ser crescente ( $\theta > 1$ ), decrescente ( $\theta < 1$ ) e constante ( $\theta = 1$ ), $t > 0$ , com $\alpha > 0$ e $\theta > 0$ ;		
	Função de confiabilidade: $R(t) = e^{-\alpha t^\theta}$ , $t > 0$		
Lognormal (AZARKHAIL; MODARRES, 2012)	Relacionamento com a distribuição normal (ou Gaussiana): se $T > 0$ tem distribuição lognormal, então $X = \ln(T)$ tem distribuição normal.	Representa a física da falha.	Só modela fenômenos com taxa de falha unimodal.
Rayleigh	Caso particular (ou submodelo) da distribuição Weibull com parâmetro de forma $\theta = 2$ . Taxa de falha cresce constante com o tempo.	Utilizada em ensaios de grande escala de vida e confiabilidade (OH; SOHN, 2018).	A função de taxa de falha tem forma única (linearmente crescente).
q-exponencial (SALES FILHO et al., 2017)	Valores extremos e testes de fadiga.	Melhor que a Weibull para problemas de <i>stress-strength</i> , principalmente para valores altos e muitos dados.	
Exponential Power (SHEHLA; KHAN, 2016)	Função de taxa de falha crescente ou em forma de banheira.	Uma das poucas distribuições com 2 parâmetros da literatura, cuja função de taxa de falha pode assumir forma de banheira (tal como a flexible Weibull).	Menos flexível do que a distribuição flexible Weibull (não modela dados com taxa de falha unimodal).
Discrete Weibull (ALMALKI; NADARAJAH, 2014)	Utiliza escalas discretas de tempo (dias, semanas, meses, etc.)	Acomoda a natureza discreta dos dados (muitos autores ignoram esta característica, tratando-os como contínuos).	Grande número de empates.
Gama Generalizada (RAMOS et al., 2019)	Generalização com 3 parâmetros da exponencial, que também foi proposta para unificar outras distribuições, como: Weibull e lognormal.	Flexibilidade de utilização em áreas distintas, como: confiabilidade, processamento de dados e meteorologia.	Dificuldade na estimação dos parâmetros e falha em situações de várias amostras.
	Função taxa de falha: $h(t) = \frac{\alpha \mu^\alpha \phi t^{\alpha\phi-1} \exp\{-(\mu t)^\alpha\}}{\Gamma(\phi, (\mu t)^\alpha)}$ , com $t > 0$ , $\alpha > 0$ , $\phi > 0$ e $\mu > 0$ ;		
	Função de confiabilidade: $R(t) = \frac{\Gamma(\phi, (\mu t)^\alpha)}{\Gamma(\phi)}$ , $t > 0$ ;		

	em que: $\Gamma(\phi) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{\phi-1} dt$ e $\Gamma(\phi, (\mu t)^{\alpha}) = \int_{(\mu t)^{\alpha}}^{\infty} e^{-t} t^{\phi-1} dt$ .		
Flexible Weibull (ALMALKI; NADARAJAH, 2014)	Função de taxa de falha crescente, da curva da banheira ou unimodal. Função de taxa de falha: $h(t) = (\alpha + \beta/t^2)e^{\alpha t - \beta/t}$ , $t > 0$ , com $\alpha$ e $\beta > 0$ ; Função de confiabilidade: $R(t) = \exp\{-e^{\alpha t - \beta/t}\}$ , $t > 0$ .	Acomoda a curva da banheira.	
Gaussiana	Distribuição de probabilidade mais importante em Estatística. Teorema Central do Limite. Curva em forma de sino.	Erros de medida. Representa também a vida útil do componente durante a fase de desgaste (TRIVEDI, 2016).	Papel de menor importância em confiabilidade. Uso direto muitas vezes limitado à modelagem dos erros de modelos de regressão (COOLEN, 2014).

Fonte: Elaboração Própria (2020)

Seguindo a mesma sistemática para elaboração da Figura 12, foram levantados os dados para elaboração da Figura 13. Para tanto, a base de dados foi acessada em 17/08/2020 fazendo o uso de combinações de palavras-chave das distribuições que estão representadas na mesma, combinadas com às palavras confiabilidade e combinações relativas a desenvolvimento de produto (DERWENT INNOVATION INDEX - DII, 2020). O período de busca foi restrito aos anos de 2001 até 2019 e mostra que as distribuições de Weibull, Gama e Exponencial continuam sendo as mais utilizadas nos dias de hoje.

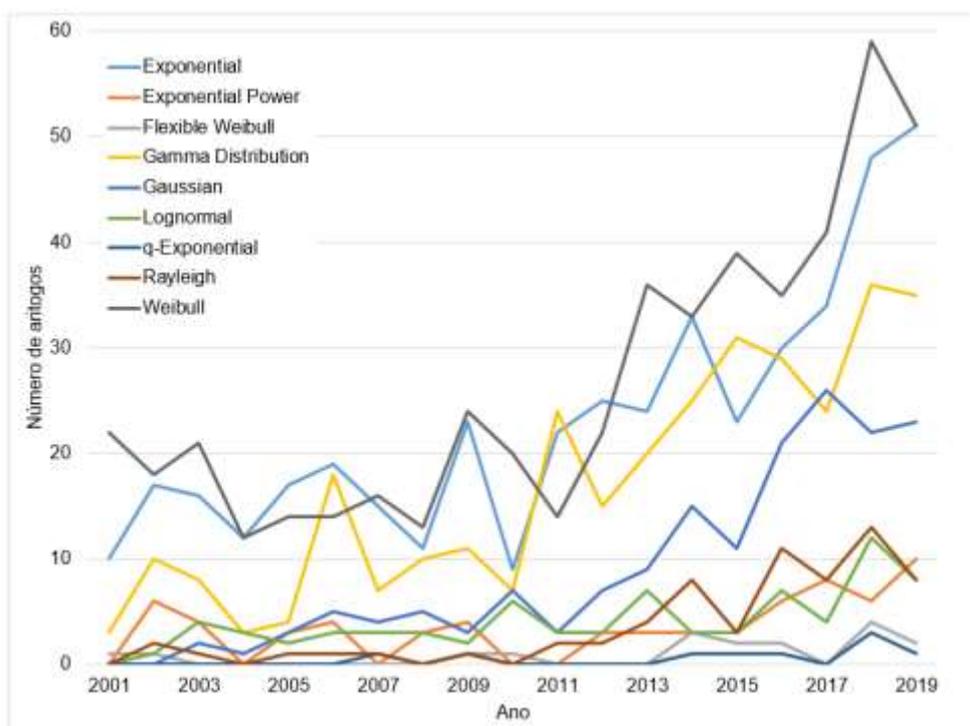


Figura 13 Artigos sobre distribuições de probabilidade e confiabilidade.

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de (DERWENT INNOVATION INDEX - DII, 2020)

Além da seleção do modelo probabilístico para melhor representar o comportamento da confiabilidade no tempo, também é fundamental o processo de estimação de parâmetros das respectivas curvas. Nesta etapa, entra, por exemplo, a estimação por máxima verossimilhança ou MLE (*maximum likelihood estimation*) (RAMOS et al., 2018). Assim como a discriminação dos modelos candidatos através de critérios de seleção de modelos (critérios de informação *Akaike information criterion* - AIC e o *Bayesian information criterion* - BIC, por exemplo). A abordagem de máxima verossimilhança clássica (MLE) de Fisher tem sido bastante empregada, mas apresenta algumas desvantagens por não ser usual para amostras muito pequenas. Pois, nestes cenários (amostras pequenas ou moderadas), as estimativas de máxima verossimilhança produzidas podem ter viés apreciável.

## 2.6. OPORTUNIDADES DE INOVAÇÃO NOS ESTUDOS REFERENTES A LCE

A partir do estudo do estado da arte apresentado nos tópicos anteriores, a Tabela 5 sintetiza as oportunidades de inovação nos estudos referentes a LCE levando-se em consideração os objetivos do presente trabalho.

Tabela 5 Principais lacunas identificadas na revisão de literatura.

Modelo	Vantagens	Principais lacunas atuais
LCE	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inclui a sustentabilidade na avaliação do ciclo de vida (THOMA; ELLSWORTH; YAN, 2018).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A abordagem ainda é reducionista (HALOG; MANIK, 2011);</li> <li>Não inclui a visão da tecnologia (PEÇAS et al., 2016);</li> <li>Não é modelo integrado, pois cada dimensão é analisada separadamente (HALOG; MANIK, 2011);</li> <li>Não engloba a dimensão confiabilidade (LEIMEISTER; KOLIOS, 2018);</li> <li>Poderia incluir a incerteza na análise (MUNTHE et al., 2014);</li> <li>Deveria englobar uma visão mais holística no PDP (THOMÉ et al., 2016);</li> <li>Uso de modelos probabilísticos (TEGELTIJA et al., 2018).</li> </ul>
LCA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sistematizado pela ISO 14040/44 (FAVI; CAMPI; GERMANI, 2019);</li> <li>Possui metodologias como TRACIS, CML e IMPACT2002+ (LANDIS;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Os métodos ainda carregam incerteza (POHL et al., 1996);</li> <li>Deveriam ser mais aplicados ao negócio (GÖTZE et al., 2017).</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>THEIS, 2008); e</li> <li>Software GaBi como estado da arte (MORBIDONI A., FAVI C., 2011)</li> </ul>	
<b>SLC</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Requer indicadores e métodos mais robustos (FINKBEINER et al., 2010);</li> <li>Não inclui o contexto de saúde global (HAKOVIRTA; DENUWARA, 2020)</li> </ul>
<b>Tecnologia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Visão técnica bem difundida com o TRL (ABNT, 2015), IRL (JESUS; JR., 2018), SRL (SAUSER et al., 2006) e MRL (WARD et al., 2018);</li> <li>Visão do ciclo de vida implantado (GAO et al., 2013).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não combina a visão de mercado, competitividade e técnica (TRAPPEY et al., 2011);</li> <li>Compor uma visão de competitividade e mercado mais amplo, baseado nas 5 Forças de Porter (PORTER, 1996);</li> <li>Identificar matematicamente as etapas da curva S (KUCHARAVY; DE GUIO, 2011).</li> </ul>
<b>Confiabilidade</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Técnicas avançadas para as diversas situações de PDP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Requer integrar ao LCE no contexto da avaliação da sustentabilidade</li> </ul>

Desta forma, considerando a análise realizada e apresentada na Tabela 5, os principais aspectos que endereçam o modelo de auxílio à tomada de decisão visando produtos sustentáveis são:

- Uma visão de análise mais **holística** através da integração da dimensão **tecnologia** e da dimensão **confiabilidade**
- Incorporação da **incerteza** ao modelo;
- Análise **integrada** das variáveis, sejam elas quantitativas e/ou qualitativas;
- Proposição de indicadores **sociais** mais **robustos**; e
- Uma visão da **tecnologia** que contemple o **mercado**, a **prontidão técnica** e o **escalonamento**.

### 3. PROPOSTA DE MODELO EM REDES BAYESIANAS PARA APOIO À TOMADA DE DECISÃO VISANDO PRODUTOS SUSTENTÁVEIS

O objetivo deste capítulo é apresentar a proposta de um **modelo em RB para apoio à tomada de decisão para ser usado nas fases iniciais de PDP e DT, visando produtos sustentáveis**. A visão da sustentabilidade aqui abordada está amparada por uma perspectiva mais holística e sistêmica em relação a versão atual da LCE. Desta forma, o modelo proposto inclui as dimensões da tecnologia e da confiabilidade, que se juntam às dimensões ambiental, de custo e social.

O modelo proposto está baseado na:

- utilização das RB, portanto será suportado por uma visão probabilística (PEARL, 2003). As RB provêm a flexibilidade necessária para a construção de modelos quando envolve incerteza, além de possibilitar a combinação de dados qualitativos com quantitativos e a inclusão de dependências condicionais entre as variáveis (HOSSEINI; BARKER, 2016);
- possibilidade de efetuar modelagens que contemplem a utilização de cenários e a realização de inferências que serão fundamentais para a inclusão de contextos e opiniões distintas para minimização de incertezas (GROIS et al., 1998; HOSSEINI; IVANOV, 2020).

Para iniciar a apresentação do modelo é importante definir:

- **Dimensão:** cada uma das perspectivas do modelo da sustentabilidade, isto é, tecnologia, confiabilidade, ambiental, custo e social. O valor do “Sim”, em cada dimensão, representa a probabilidade da opção que está sendo avaliada ser sustentável;
- **Variável:** cada elemento, seja ele discreto ou contínuo, quantitativo ou qualitativo que pertence ao conjunto de determinada dimensão;
- **Cenário Externo:** na gestão estratégica, refere-se a cada uma das possibilidades de estados externos que podem influenciar o contexto de

tomada de decisão e as variáveis. São baseados nos princípios de pensamento sistêmico e análise de possíveis futuros (FINK et al., 2005);

- **Pesos:** diferentes graus de consideração que cada dimensão pode ter em decorrência dos cenários externos. A soma total dos pesos das dimensões é igual a 100%.

A Figura 14, apresenta o novo modelo conceitual da LCE, que engloba as novas dimensões da tecnologia e da confiabilidade, além de descrever as respectivas ferramentas e variáveis que serão aplicadas ao modelo. Estas novas dimensões são influenciadas pelo contexto de novas tecnologias, INDÚSTRIA 4.0 e pandemia.

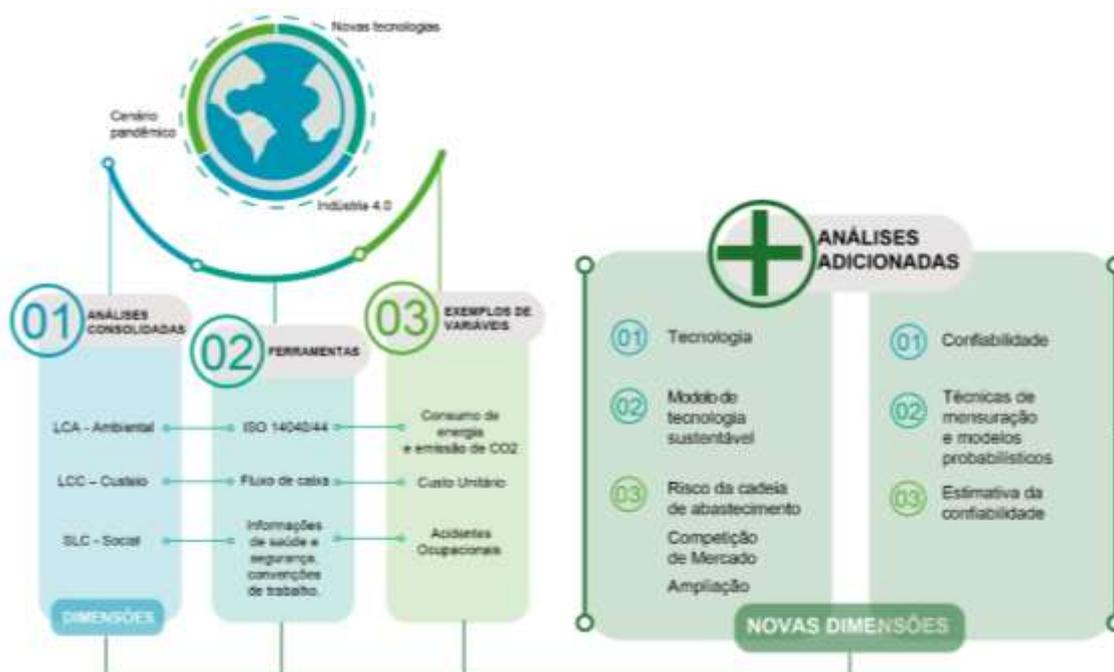


Figura 14 Novo modelo conceitual da LCE, incluindo as dimensões da Tecnologia e Confiabilidade.

Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA et al., 2021)

Como pode ser observado na Figura 15, a análise da variável **Sustentabilidade** leva em consideração as dimensões *Ambiental*, *Social*, *Custo*, *Tecnologia* e *Confiabilidade*. A variável **Sustentabilidade** é o fator central para o processo decisório e, para esta tese, é definida como a probabilidade de determinado produto ou processo, no seu ciclo de vida, atender os requisitos das dimensões

ambiental, social, custo, confiabilidade e tecnologia, objetivando garantir uma visão sistêmica.

A dimensão **Ambiental** é influenciada a priori pelas variáveis *Energia* e *Poluição*. Já a variável *Poluição* é influenciada, a priori, pelas variáveis *Eutrofização da Água – Kg PO<sub>4</sub>e* e *Acidificação do Ar – Kg SO<sub>2</sub>e*. A dimensão **Social** leva em conta a *Taxa de acidentes* e a *Covid 19*. A dimensão **Confiabilidade** é calculada considerando estimativas de confiabilidade que é influenciada pelo tempo de interesse. A dimensão **Sustentabilidade da Tecnologia** leva em consideração uma série de aspectos como: risco cadeia de suprimentos, alto nível de concorrência e escalonamento da tecnologia. A dimensão **Custo** leva em consideração o histograma de custo unitário.

Um aspecto importante também representado na figura envolve os cenários externos e os pesos. A utilização de cenários distintos será possível por meio da variável **Cenários Externos**, com a qual serão avaliados contextos diferentes e como estas mudanças alteram o modelo. Como visto na Figura 15, a variável **Cenários Externos** influenciará as variáveis: Pesos, Histograma de Custo Unitário, Casos Covid 19 / MM e Pegada de Carbono. Particularmente através da variável **Pesos**, será possível alternar a relevância de cada dimensão de acordo com as diferentes possibilidades de cenários.

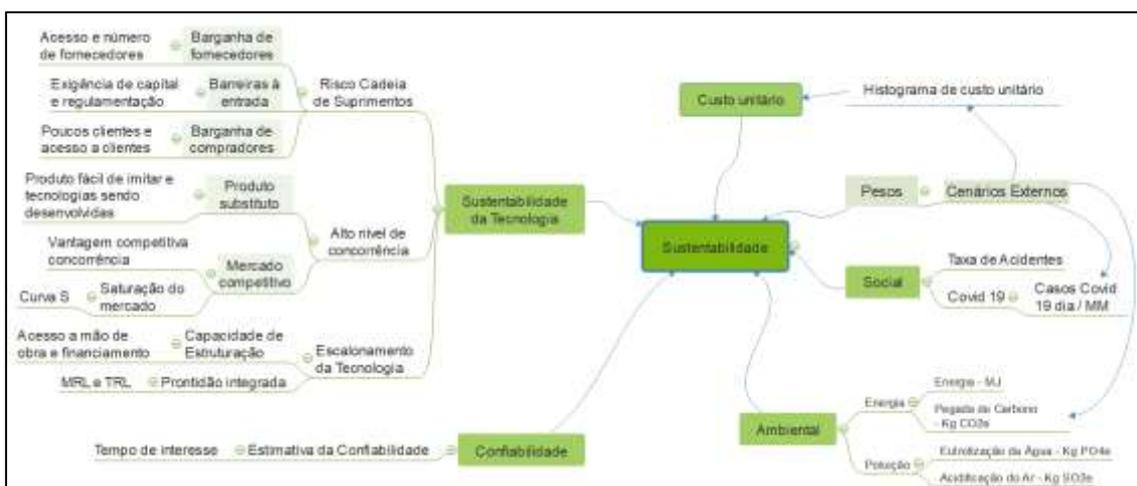


Figura 15 Estrutura do modelo proposto neste estudo.

Fonte: Elaboração própria (2020)

A incerteza é uma característica presente nas fases iniciais de PDP e DT; desta forma, necessita-se dispor de diferentes estratégias para lidar com a mesma

(SINNWELL; SIEDLER; AURICH, 2019a). Assim, o presente trabalho seguiu com as seguintes abordagens:

- utilização de cenários distintos para avaliação do modelo proposto (BERGERSON et al., 2020);
- uso da teoria da probabilidade através das RB (PEARL, 2003) ;
- utilização de dados quantitativos e qualitativos suportados por opinião de especialistas (ZHOU; FENTON; NEIL, 2014);
- visão holística da sustentabilidade representadas pelas dimensões ambiental, custo, social, tecnologia e confiabilidade.

Em função do modelo combinar variáveis qualitativas e quantitativas, como também variáveis discretas e contínuas, opta-se por construir uma RB híbrida que possibilita a combinação de variáveis contínuas e discretas no mesmo modelo (MARQUEZ; NEIL; FENTON, 2010). Para tanto, foi utilizado o software *GeNIe Academic Version 3.0.5703.0* desenvolvido pela Universidade de Pittsburgh (BAYESFUSION, 2020; DRUZDZEL, 1999). Baseado nas RB, possibilita a utilização de variáveis discretas, contínuas e determinísticas com aplicação pela comunidade científica em diferentes campos do conhecimento, como educação (TORABI; MORADI; KHANTAIMOORI, 2012), manutenção (MCNAUGHT; ZAGORECKI, 2009), marketing (SALINI; KENETT, 2009), ambiental (UUSITALO, 2007) e confiabilidade (LI; GUEDES SOARES; HUANG, 2020).

Como será posteriormente apresentado, quatro tipos de variáveis estão presentes no modelo em RB (HOSSEINI; BARKER, 2016):

1. Variáveis booleanas, que têm uma resposta binária que representam dois estados possíveis: verdadeiro e falso como é o caso da variável *Sustentabilidade da Tecnologia*;
2. Variáveis contínuas, que capturam as incertezas a partir de uma medida de média associada a uma distribuição probabilística, como é o caso da variável *Estimativa da Confiabilidade*;

3. Variáveis fixas, cujos valores são constantes, como o caso do valor de entrada do tempo da variável *Tempo de Interesse*; e
4. Variáveis rotuladas, que podem ter um número de estados discretos que é o caso da variável *TRL*.

O grafo acíclico direcionado representado pela Figura 16 apresenta a visão geral do modelo extraído do software GeNie. Nele, destaca-se a variável central *Sustentabilidade* que é afetada, a priori, pelas variáveis ambiental, custo, social, confiabilidade e sustentabilidade da tecnologia e de suas respectivas variáveis. As relações entre as demais variáveis também são retratadas na Figura 16.

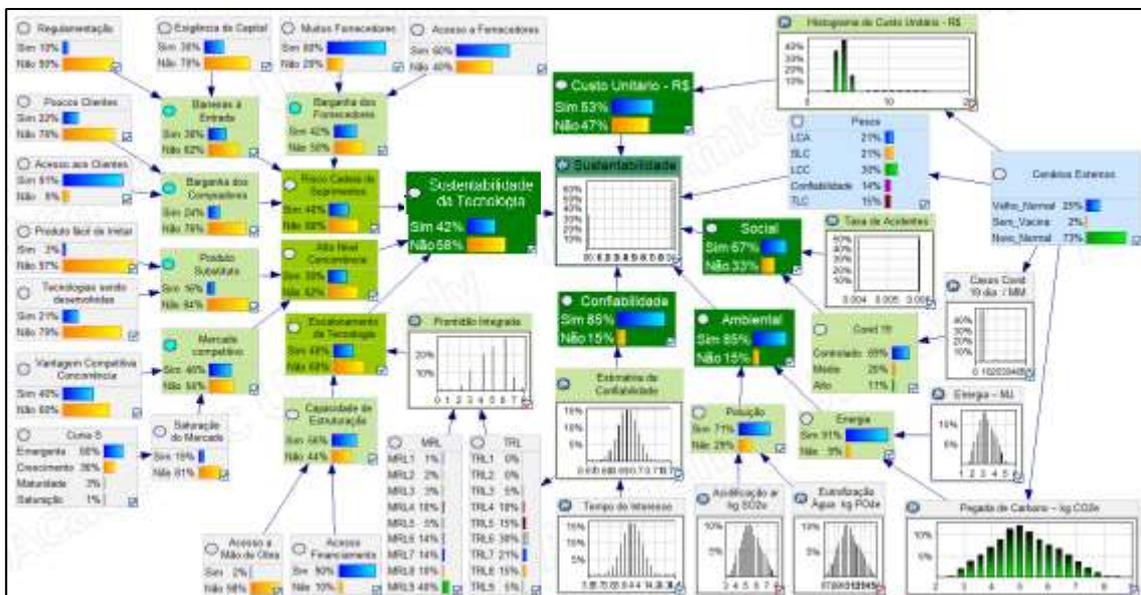


Figura 16 Modelo da Sustentabilidade.

Fonte: Elaboração Própria (2020)

O software GeNie, acima citado, disponibiliza na sua plataforma diversos algoritmos para a modelagem, como: *clustering*, *polytree* e amostragem estocástica (GENIE, 2020). Especificamente para esta tese, foi selecionado o algoritmo de *clustering*. Este algoritmo é considerado o mais rápido conhecido para atualização RB e foi originalmente proposto por Lauritzen e Spiegelhalter (LAURITZEN; SPIEGELHALTER, 1988) e melhorado por vários pesquisadores

como, por exemplo, Jensen et al. (JENSEN; LAURITZEN; OLESEN, 1990) e Dawid (DAWID, 1992).

Particularmente para as RB híbridas, dois algoritmos são aplicados: amostragem direta híbrida e discretização. A amostragem direta híbrida é usada sempre que não houver evidência na rede ou todas as evidências estiverem em nós sem pai. Já a discretização é uma abordagem para resolver RB híbridas nas quais foram feitas observações em nós que têm variáveis a priori. Em seu estágio intermediário, o algoritmo converte uma RB híbrida em uma RB discreta (GENIE, 2020). Pelas características do modelo e respectivas variáveis, a escolha foi pela discretização. Contudo, é importante ressaltar que esta conversão em si, estabelece-se numa limitação da modelagem, pois o processo de discretização deve ser muito bem realizado para não impor propagação de erros ao modelo.

A partir desta contextualização conceitual do modelo, da descrição do software utilizado e seus algoritmos, outras etapas na metodologia foram seguidas, seguindo o processo de construção de RB baseados em (PEARL, 1988) e (KORB; NICHOLSON, 2010). Uma vez apresentadas as variáveis de interesse referentes ao domínio do conhecimento que, no caso particular desta tese, como visto anteriormente, foi realizada revisão de literatura associada às dimensões ambiental, de custo, social, tecnologia e confiabilidade.

A partir daí, foi elaborada a topologia da RB considerando a revisão de literatura e experiência do autor. Em seguida, esta topologia, foi apresentada para diversos especialistas e doutores conhecedores deste domínio de conhecimento, principalmente, desenvolvimento de produto e sustentabilidade. Foram consultados sete doutores e três especialistas que colaboraram com sugestões e críticas, objetivando identificar de forma qualitativa a dependência entre as variáveis e completando a fase de elicitación e validación da topologia (GEIGER; VERMA; PEARL, 1990);

Foi assumida a premissa da propriedade de Markov, isto é, não existem dependências diretas que não estejam explícitas através dos arcos na RB. Em algumas variáveis, esta estratégia pode ser considerada uma simplificação, contudo numa visão geral, propõe-se o conceito de modelo compacto. Principalmente por três razões: menos valores de probabilidade que requerem

especificação e atualização; as RB excessivamente densas não conseguem representar: as independências explicitamente e as dependências causais no domínio. Portanto a estrutura final da RB proposta constitui o mapa de dependência e independência entre as variáveis (KORB; NICHOLSON, 2010);

Finalmente, foram desenvolvidas estratégias de quantificação das variáveis e detalhamento das mesmas que serão apresentadas a seguir. Para tanto, foi desenvolvida uma tabela padronizada, conforme a Tabela 6. Cada tabela terá o nome da variável, a tabela probabilística de nós (TPN) e a descrição da variável.

Tabela 6 Tabela padronizada para descrição de variável do modelo.

Variável	TPN: tabelas probabilísticas de nós que podem ser representadas por tabelas estimadas ou fórmulas.
	<b>Descrição:</b> texto referência para detalhar a variável, seu significado e referência, caso seja necessário.

Fonte: Elaboração própria (2020)

O detalhamento iniciará pela variável sustentabilidade e, na sequência envolverá as demais dimensões. A variável Sustentabilidade, como exposto na Figura 17, apresenta as relações diretas com as variáveis *Custo Unitário – R\$, Social, Ambiental, Confiabilidade, Sustentabilidade da Tecnologia e Pesos*, e a indireta com a variável *Cenários Externos*.

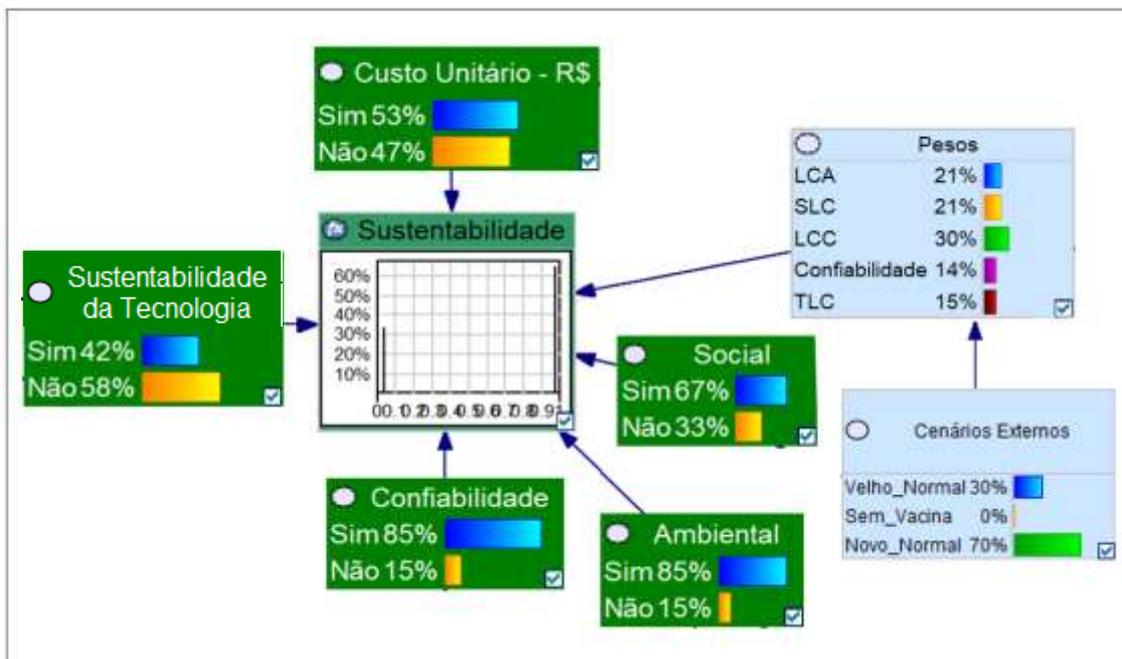


Figura 17 Variável Sustentabilidade.

Fonte: Elaboração Própria (2020)

Na Tabela 7 é apresentada as TPN's e descrições das variáveis *Sustentabilidade*, *Pesos* e *Cenários Externos*.

Tabela 7 Variável Sustentabilidade, Pesos e Cenários Externos.

	<p><b>TPN</b></p> $S=1-If(Pesos="LCA", LCA, If(Pesos="LCC", LCC, If(Pesos="TLC", TLC, If(Pesos="SLC", SLC, RE))))$																								
Sustentabilidade	<p>Descrição: variável boleana que representa a probabilidade de um produto ser sustentável. É a variável central do modelo que é afetada, a priori, pelas variáveis <i>Custo Unitário – R\$, Social, Ambiental, Confiabilidade, Sustentabilidade da Tecnologia</i> e <i>Pesos</i>. A fórmula acima representada é uma média das variáveis <i>Custo Unitário – R\$, Social, Ambiental, Confiabilidade, Sustentabilidade da Tecnologia</i> ponderadas aos seus respectivos pesos extraídos da variável <i>Pesos</i>.</p>																								
	<p><b>TPN</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Cenários Externos</th> <th>Velho_Normal</th> <th>Sem_Vacina</th> <th>Novo_Normal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>LCA</td> <td>10%</td> <td>15%</td> <td>25%</td> </tr> <tr> <td>SLC</td> <td>5%</td> <td>50%</td> <td>25%</td> </tr> <tr> <td>LCC</td> <td>60%</td> <td>15%</td> <td>10%</td> </tr> <tr> <td>Confiabilidade</td> <td>10%</td> <td>5%</td> <td>20%</td> </tr> <tr> <td>TLC</td> <td>15%</td> <td>15%</td> <td>20%</td> </tr> </tbody> </table>	Cenários Externos	Velho_Normal	Sem_Vacina	Novo_Normal	LCA	10%	15%	25%	SLC	5%	50%	25%	LCC	60%	15%	10%	Confiabilidade	10%	5%	20%	TLC	15%	15%	20%
Cenários Externos	Velho_Normal	Sem_Vacina	Novo_Normal																						
LCA	10%	15%	25%																						
SLC	5%	50%	25%																						
LCC	60%	15%	10%																						
Confiabilidade	10%	5%	20%																						
TLC	15%	15%	20%																						
Pesos	<p>Descrição: para fins desta tese foram criadas faixas ilustrativas (HOSSEINI; BARKER, 2016), considerando que no cenário <i>Velho_Normal</i> é dada mais ênfase ao custo e menos ao ambiental e social. No cenário <i>Sem_Vacina</i>, supõe-se uma maior ênfase a dimensão Social, devido ao maior risco à vida humana (HAKOVIRTA; DENUWARA, 2020; KUZEMKO et al., 2020). Por fim, no cenário <i>Novo_Normal</i> espera-se uma maior ênfase no social e no ambiental (KUZEMKO et al., 2020).</p>																								

---

**TPN:** Velho\_Normal = A; Sem\_Vacina = B e Novo\_Normal = C

---

**Descrição:** para fins desta tese, serão consideradas cenários distintos de probabilidade durante as simulações, de forma que seja possível avaliar em diferentes contextos. Salienta-se que a soma de  $A + B + C = 100\%$ , respectivamente a probabilidade dos cenários *Velho\_Normal*, *Sem\_Vacina* e *Novo\_Normal*. Estes cenários tem as seguintes características:

Cenários  
Externos

- *Velho\_Normal*: com uma solução de vacina implantada, a sociedade volta a um contexto anterior, valorizando menos a dimensão social e ambiental, dando maior peso a dimensão custo;
  - *Sem\_Vacina*: possível cenário que não foi possível viabilizar a aprovação de uma vacina. Neste caso, a dimensão Social passa a ter maior peso;
  - *Novo\_Normal*: com uma solução de vacina implantada e com a percepção de valor da sociedade para maior equilíbrio entre os pesos das dimensões.
- 

Fonte: Elaboração Própria (2020)

A seguir, é apresentada a construção do modelo a partir de cada dimensão e suas variáveis associadas. Também são detalhadas as metodologias para avaliação ou quantificação de cada nó da RB, como também, quando necessário, os respectivos critérios de discretização. Para cada dimensão foram construídos grafos que representam o modelo, como também tabela probabilística de nós (TPN) que descrevem a variável, seu significado e a metodologia de cálculo.

### 3.1. DIMENSÃO AMBIENTAL

A mensuração da variável *Ambiental* no modelo de tomada de decisão, conforme apresentado na Figura 18, leva em consideração as variáveis *Poluição* e *Energia*. A variável *Poluição* considera *Eutrofização Água - kg PO<sub>4</sub>e* e *Acidificação ar - kg SO<sub>2</sub>e*. Já a variável *Energia* é calculada considerando as variáveis *Energia – MJ* e *Pegada de Carbono – kg CO<sub>2</sub>*. Por fim, a variável *Pegada de Carbono – kg CO<sub>2</sub>* é calculada considerando os *Cenários Externos*. Salienta-se que os *Cenários Externos* estão detalhados na Tabela 7.

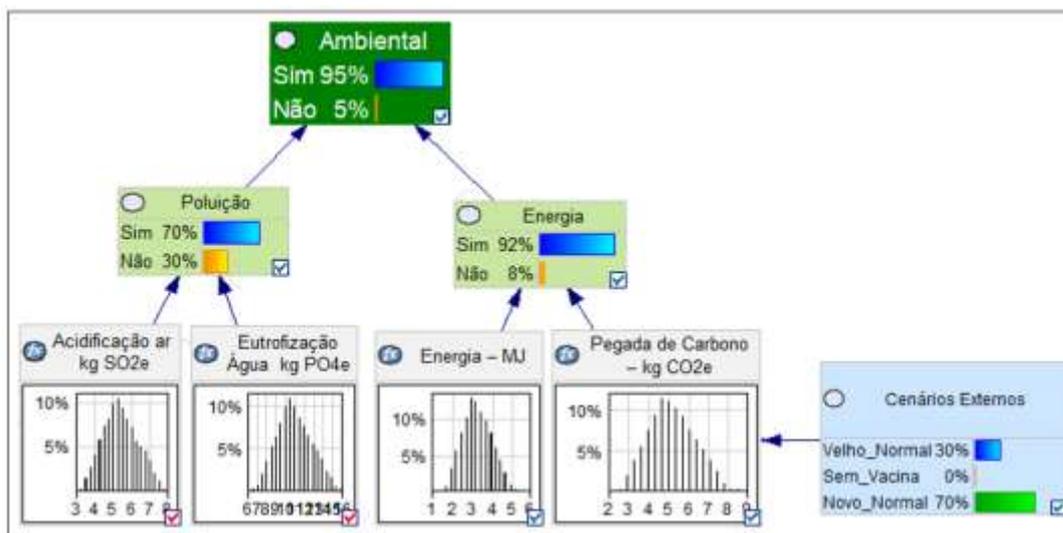


Figura 18 Grafo acíclico da dimensão Ambiental.

Fonte Elaboração Própria (2020)

Com objetivo de incluir a incerteza na mensuração dos resultados, foram utilizados os parâmetros calculados por (GUO; MURPHY, 2012) no estudo de LCA, para estimar os mínimos e máximos dos valores. Os valores obtidos através da ferramenta GaBi para as variáveis *Eutrofização Água - kg PO4e*, *Acidificação ar - kg SO2e*, *Energia - MJ* e *Carbono - kg CO2e* foram considerados uma média. A distribuição probabilística triangular do GeNie será utilizada para delimitar estes extremos, cuja fórmula é: Triangular(mínimo, média, máximo). Para cada variável acima listada, foi feita uma pré-discretização de igual largura (CATLETT, 1991) com três intervalos (Baixo, Médio, Alto).

Por fim, são detalhadas as respectivas descrições e TPN de cada variável nas Tabela 8, referente à variável *Ambiental*, Tabela 9, que descreve a variável *Energia* e Tabela 10 da variável *Poluição*. Já a Tabela 11 apresenta as variáveis a serem calculadas pela ferramenta GaBi além das suas respectivas descrições.

Tabela 8 Variável Ambiental.

	<i>Energia</i>	Sim		Não	
		Sim	Não	Sim	Não
Ambiental	<i>Poluição</i>	95%	55%	40%	5%
		5%	45%	60%	95%

**Descrição:** variável booleana Ambiental que é afetada a priori pelas variáveis *Energia* e *Poluição*.

Fonte: Elaboração Própria (2020)

Tabela 9 Variável Energia.

Energia - MJ	Baixo			Médio			Alto		
Pegada de CO <sub>2</sub> e – Kg	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
Sim	95%	90%	70%	80%	35%	15%	70%	10%	5%
Não	5%	10%	30%	20%	65%	85%	30%	90%	95%

Descrição: a probabilidade posterior referente a variável *Energia* depende das variáveis *Pegada de Carbono – kg CO<sub>2</sub>e* e *Energia – MJ* e das suas respectivas discretizações. Sugere-se que esta pré-discretização seja realizada a partir da opinião de especialistas (CATLETT, 1991; LIMA, 2014). Para fins desta tese foram criadas faixas ilustrativas (HOSSEINI; BARKER, 2016).

Fonte: Elaboração Própria (2020)

Tabela 10 Variável Poluição.

Eutrofização Água - kg	Baixo			Médio			Alto		
Acid. ar - kg SO <sub>2</sub> e	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
Sim	95%	90%	70%	80%	35%	15%	70%	10%	5%
Não	5%	10%	30%	20%	65%	85%	30%	90%	95%

Descrição: a probabilidade posterior da variável *Poluição* depende da *Acidificação ar - kg SO<sub>2</sub>e* e *Eutrofização Água - kg PO<sub>4</sub>e* e das suas respectivas discretizações. Sugere-se que esta pré-discretização seja realizada a partir da opinião de especialistas (CATLETT, 1991; LIMA, 2014). Para esta tese foram criadas faixas ilustrativas (HOSSEINI; BARKER, 2016).

Fonte: Elaboração Própria (2020)

Tabela 11 Variáveis medidas na LCA.

Energia – MJ	<p><b>TPN</b>  <math>En = \text{Triangular}(51\% * E, E, 168\% * E)</math></p> <p>Descrição: variável que representa o consumo energético, variável relevante da LCA (ISHII, 1995). Extremos calculados conforme (GUO; MURPHY, 2012).</p>
Pegada de Carbono – kg CO <sub>2</sub> e	<p><b>TPN</b>  <math>CO_2e = \text{if}(\text{Cenários\_Externos} = \text{"Velho\_Normal"}, \text{Triangular}(51\% * CO_2, CO_2, 168\% * CO_2), 96\% * \text{Triangular}(51\% * CO_2, CO_2, 168\% * CO_2))</math></p> <p>Descrição: representa as emissões de CO<sub>2</sub> associados a mudança climática (LE QUÉRÉ et al., 2020). No modelo, é considerado que é afetada, a priori, pela variável <i>Cenário Externo</i> descrita no tópico 3, cujos cenários <i>Sem_Vacina</i> e <i>Novo_Normal</i> podem ter redução da emissão, conforme as estimativas de (LE QUÉRÉ et al., 2020). Extremos calculados conforme (GUO; MURPHY, 2012).</p>
Acidificação ar - kg SO <sub>2</sub> e	<p><b>TPN</b>  <math>SO_2e = \text{Triangular}(62\% * SO_2, SO_2, 155\% * SO_2)</math></p> <p>Descrição: variável de impacto, associada à poluição e considerada importante fator de caracterização na LCA (OLIVEIRA et al., 2019). Extremos calculados conforme (GUO; MURPHY, 2012).</p>
Eutrofização Água - kg PO <sub>4</sub> e	<p><b>TPN</b>  <math>PO_4e = \text{Triangular}(64\% * PO, PO, 157\% * PO)</math></p> <p>Descrição: variável relativa à poluição da água (OLIVEIRA et al., 2019). Extremos calculados conforme (GUO; MURPHY, 2012).</p>

Fonte: Elaboração Própria (2020)

### 3.2. DIMENSÃO CUSTO

O grafo acíclico direcionado Figura 19, mostra que a variável *Custo Unitário – R\$*, depende da variável *Histograma do Custo Unitário – R\$* que pode variar em função da variável *Cenários Externos*.



Figura 19 Grafo acíclico da dimensão Custo.

Fonte Elaboração Própria (2020)

Já a Tabela 12 apresenta os critérios probabilísticos e descrições de cada nó da Figura 19. Para a dimensão custo (LCC), através da sua variável *Custo Unitário – R\$*, são relatadas na literatura as dificuldades de cálculo, principalmente em fases iniciais de PDP (DUVERLIE; CASTELAIN, 1999). Desta forma, para fins de aproximação e com intuito de lidar com a incerteza, o presente trabalho utilizou a referência de faixa de acurácia entre -30% e 50% citado no estudo de (SARAVI et al., 2008).

Tabela 12 Variáveis da dimensão Custo.

	TPN	Baixo	Médio	Alto	Crítico
	Sim	90%	70%	40%	25%
	Não	10%	30%	60%	75%
Custo Unitário - R\$	<b>Descrição:</b> a probabilidade posterior referente a variável <i>Custo Unitário – R\$</i> da dimensão <i>Custo</i> depende do <i>Histograma do Custo Unitário – R\$</i> e da sua respectiva discretização. Desta forma, são formadas oito combinações entre as opções possíveis que terão seus valores acima estimados para fins ilustrativos da presente tese (HOSSEINI; BARKER, 2016). Em situações reais estes valores podem ser pré-discretizados e valorados por especialistas (CATLETT, 1991; LIMA, 2014).				
Histograma do Custo Unitário – R\$	<b>TPN</b> $\text{Custo} = \text{If}(\text{Cenários\_Externos} = \text{"Sem\_Vacina"}, \text{Triangular}((1 - 30\%) * M_2, M_2, (1 + 50\%) * M_2), \text{Triangular}((1 - 30\%) * M_1, M_1, (1 + 50\%) * M_1))$				
	<b>Descrição</b> Considerando que o valor calculado no LCC é um valor médio $M_1$ , obtém-se o mínimo e o máximo, dispondo os valores intermediários a partir de uma distribuição probabilística triangular de forma a garantir estes extremos				

---

propostos por (SARAVI et al., 2008). Para cálculo do  $M_2$ , considera-se para fins ilustrativos (HOSSEINI; BARKER, 2016) seria 30% maior do que o  $M_1$ , portanto  $M_2 = (1+30\%) * M_1$ . Isto é, no *Cenário Externo* chamado “*Sem\_Vacina*”, em função da paralisação parcial das empresas e cadeias de suprimento, pressupõe-se um aumento estimado de custos neste patamar.

Como o estudo será por efeito comparativo entre diferentes opções no PDP, será realizada uma discretização de igual largura, na qual divide-se os valores em  $k$  intervalos de igual largura (CATLETT, 1991). Neste caso, quatro intervalos: Baixo, Médio, Alto e Crítico obtidos a partir de informações de mercado ou opinião de especialistas.

---

Fonte: Elaboração Própria (2020)

### 3.3. DIMENSÃO SOCIAL

Como visto, (FINKBEINER et al., 2010), sugere que a dimensão social do LCE, necessita indicadores e métodos mais robustos. Desta forma, este trabalho propôs utilizar duas variáveis para representar a quantificação desta dimensão no modelo. A primeira deu a **perspectiva da empresa** e a segunda o contexto mais amplo da saúde, principalmente em decorrência do momento atual de pandemia causada pela COVID-19.

Portanto, pela perspectiva da empresa, foram selecionados os dados de acidentes de trabalho com afastamento como indicador da dimensão social, seguindo os estudos da OIT (BORELLI, 1992; KOIFMAN; BLANK; DE MORAES SOUZA, 1983; MPT; OIT, 2019; SANTANA et al., 2006; SANTOS, JULIO C. J.; MELO, 2005). Desta forma, selecionou-se os dados de acordo com cada setor produtivo das tecnologias de interesse. E, em seguida, obteve-se uma parametrização dos dados com a taxa de acidentes de trabalho com afastamento, de acordo com a equação (4):

$$S_o = \frac{\text{Número de Acidentes com Afastamento no Ano do Setor}}{\text{Número de Empregados no Ano do Setor}} \quad (4)$$

Segue abaixo, as etapas desenvolvidas para obtenção dos dados e construção da taxa:

1. Identificação do perfil da empresa que fabrica o produto e verificação do CNAE da mesma (FAZENDA, 2003);
2. Levantamento do número de empregados com afastamento por ano, de acordo os dados do CNAE referentes às tecnologias que serão comparadas (FAZENDA, 2017);

3. Levantamento da quantidade de empregados no ano para cada CNAE identificado (DIEESE, 2016); e
4. Utilização da fórmula expressa por  $S_o$ .

Através da segunda variável, foi levada em consideração a **perspectiva da visão mais global da saúde**. Desta forma, foram utilizados os dados consolidados pela ECDC – European Centre for Disease Prevention and Control, criando faixas de criticidade (ECDC, 2020). Estes dados foram baixados do referido sítio e, em seguida, deverá ser selecionado o indicador referente ao Brasil, particularmente à média móvel dos últimos 14 dias por milhão de habitantes. Por fim, elaborado o gráfico representado pela Figura 20, que indica as faixas de discretização apresentadas no eixo y (0 – 100, 101 – 200, 201 -300 e 301 – 400) que foram a referência de impacto para a saúde humana.

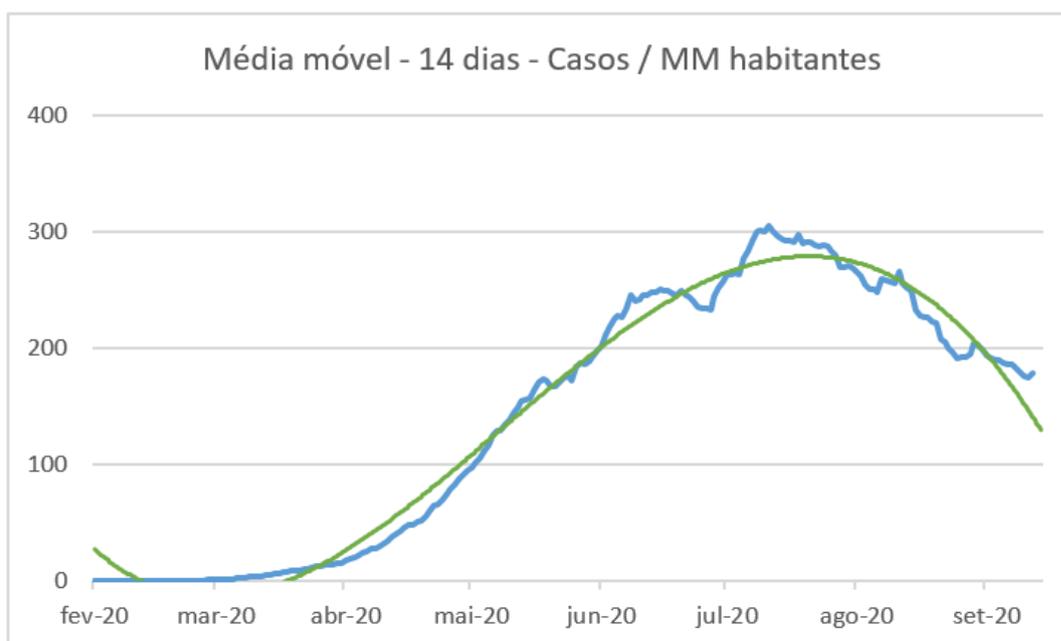


Figura 20 COVID-19 – Média móvel (14 dias) / MM Habitantes.

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de (ECDC, 2020)

A partir das variáveis selecionadas foi modelada a Figura 21, que descreve como a variável Social depende das variáveis *Taxa de Acidentes* e *Covid 19*. Já a variável *Covid 19* é influenciada pela *Casos Covid 19 dia / MM*. Esta última pode variar em função dos *Cenários Externos*. Completando esta descrição, a Tabela 13 detalha os critérios probabilísticos e às respectivas descrições de cada variável.

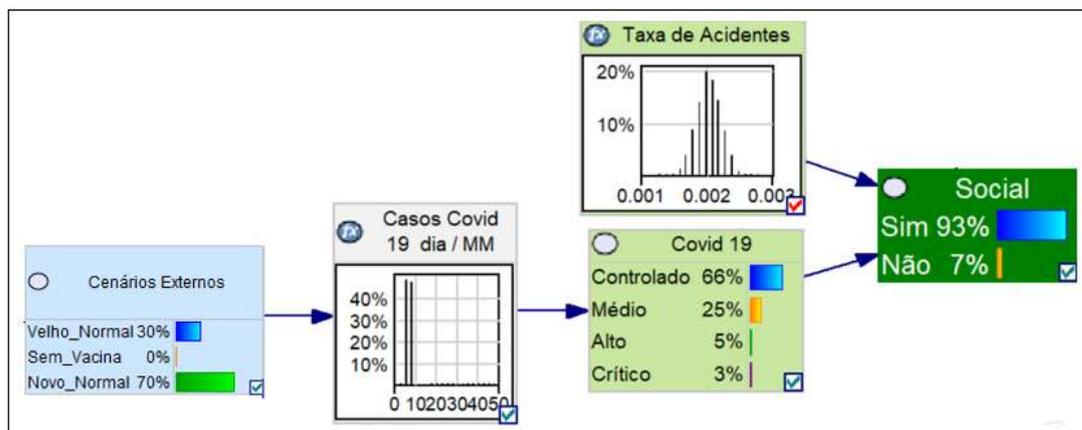


Figura 21 Grafo acíclico da dimensão Social.

Fonte: Elaboração própria (2020)

Tabela 13 Variáveis da dimensão Social.

	TPN	Taxa Acidentes	Baixo			Médio			Alto		
Social	COVID-19		Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
	Sim		90%	70%	60%	80%	60%	50%	70%	50%	10%
	Não		10%	30%	40%	20%	40%	50%	30%	50%	90%
	<b>Descrição:</b> são formadas combinações entre as opções possíveis com valores estimados para fins ilustrativos da presente tese (HOSSEINI; BARKER, 2016). Em situações reais estes valores podem ser pré-discretizados e valorados por especialistas (CATLETT, 1991; LIMA, 2014).										
	<b>TPN:</b> $Tx\_acidentes = \text{lf}(\text{Bernoulli}(0.5)) = 0, S_{01}, S_{02}$										
Taxa de Acidentes	<b>Descrição:</b> considera-se que serão obtidos pelo menos os valores relativos aos dois últimos anos para o valor calculado pela $S_0$ , respectivamente $S_{01}$ e $S_{02}$ . Em seguida pressupõe-se uma distribuição discreta de Bernoulli (LUVALLE; LEFEVRE; KANNAN, 2004) para fins ilustrativos desta tese (HOSSEINI; BARKER, 2016). Será realizada uma discretização de igual largura, na qual divide-se os valores em quatro intervalos (CATLETT, 1991).										
Covid 19	TPN	0 – 100	>100 – 200	>200 – 300	>300						
	Controlado	70%	50%	30%	10%						
	Médio	20%	30%	40%	20%						
	Alto	10%	20%	30%	70%						
	<b>Descrição:</b> são formadas combinações entre as opções possíveis que terão seus valores acima estimados para fins ilustrativos (HOSSEINI; BARKER, 2016). Em situações reais, estes valores podem ser pré-discretizados e valorados por especialistas (CATLETT, 1991; LIMA, 2014).										
	<b>TPN:</b> $\text{Casos\_Covid\_19} = \text{lf}(\text{Cenários\_Externos} = \text{"Sem\_Vacina"}, \text{Normal}(\text{Pico}, \text{desvio\_padrão}), \text{Normal}(\text{Média}, \text{desvio\_padrão}))$										
Casos Covid 19 dia / MM	<b>Descrição:</b> a partir dos dados obtido no sítio (ECDC, 2020) serão calculados os parâmetros de cada distribuição ( <i>Pico</i> , <i>desvio padrão</i> e <i>Mínimo</i> ), seguindo a variável Cenários Externos. Para fins ilustrativos, assume-se que a distribuição é normal. Será realizada uma discretização de igual largura (CATLETT, 1991).										

Fonte: Elaboração própria (2020)

### 3.4. DIMENSÃO SUSTENTABILIDADE DA TECNOLOGIA

Para incluir a dimensão tecnologia, foi proposto o conceito de **Sustentabilidade da Tecnologia (ST)** no modelo, que engloba a **perspectiva externa** de mercado e sua competitividade, expressa pelo modelo das **Cinco Forças de Porter** (PORTER, 1996), aliado a **perspectiva interna** da empresa, expressa pela capacidade de **escalamento da tecnologia**, que pode ser composto por fatores como: financeiro e / ou tecnológico (LI, 2009).

Convém salientar aqui que a perspectiva externa abordada pelas 5 Forças de Porter estão relacionadas ao mercado e à sua competitividade que são diferentes da perspectiva que a variável *Cenário Externo* trará ao modelo. A perspectiva da variável *Cenários Externos* estará relacionada à possíveis acontecimentos que não estão sob o controle do mercado e seus agentes. Particularmente ao modelo, foram trazidos três possíveis cenários externos e suas combinações probabilísticas:

- **Velho\_Normal**: com uma solução de vacina implantada, a sociedade volta a um contexto anterior, valorizando menos a dimensão social e ambiental, dando maior peso a dimensão custo;
- **Sem\_Vacina**: possível cenário que não foi possível viabilizar a aprovação de uma vacina. Neste caso, a dimensão Social passa a ter maior peso;
- **Novo\_Normal**: com uma solução de vacina implantada e com a percepção de valor da sociedade para maior equilíbrio entre os pesos das dimensões.

Compondo a **perspectiva externa**, foram selecionadas as variáveis do modelo das Cinco Forças de Porter: *Barganha de Fornecedores*, *Barreiras à Entrada*, *Barganha de Compradores*, *Produto Substituto* e *Mercado Competitivo*. Para cada uma delas, foram selecionadas variáveis qualitativas que também estão expressas no trabalho do autor (PORTER, 1996) e estão refletidas na Figura 22.

Pela **perspectiva interna** da empresa, serão consideradas as variáveis tradicionais da prontidão da tecnologia - **TRL** (ANDRADE et al., 2019) e da prontidão da manufatura - **MRL** (ENGEL et al., 2012). Em conjunto com estas

últimas, será adicionada a capacidade de estruturação do negócio que combina acesso a recursos financeiros e à mão de obra (LI, 2009).

O grafo acíclico direcionado representado na Figura 22 demonstra as relações da variável *Sustentabilidade da Tecnologia* e suas variáveis, a priori, *Risco Cadeia de Suprimentos*, *Alto Nível Concorrência* e *Escalonamento da Tecnologia*. A mesma figura também retrata as demais variáveis relacionadas a esta dimensão e suas relações. Salienta-se que as variáveis *Risco Cadeia de Suprimentos*, *Alto Nível Concorrência* consolidam as Cinco forças de Porter: barganha dos fornecedores, barreiras à entrada, barganha dos compradores, produto substituto e mercado competitivo (PORTER, 1996).

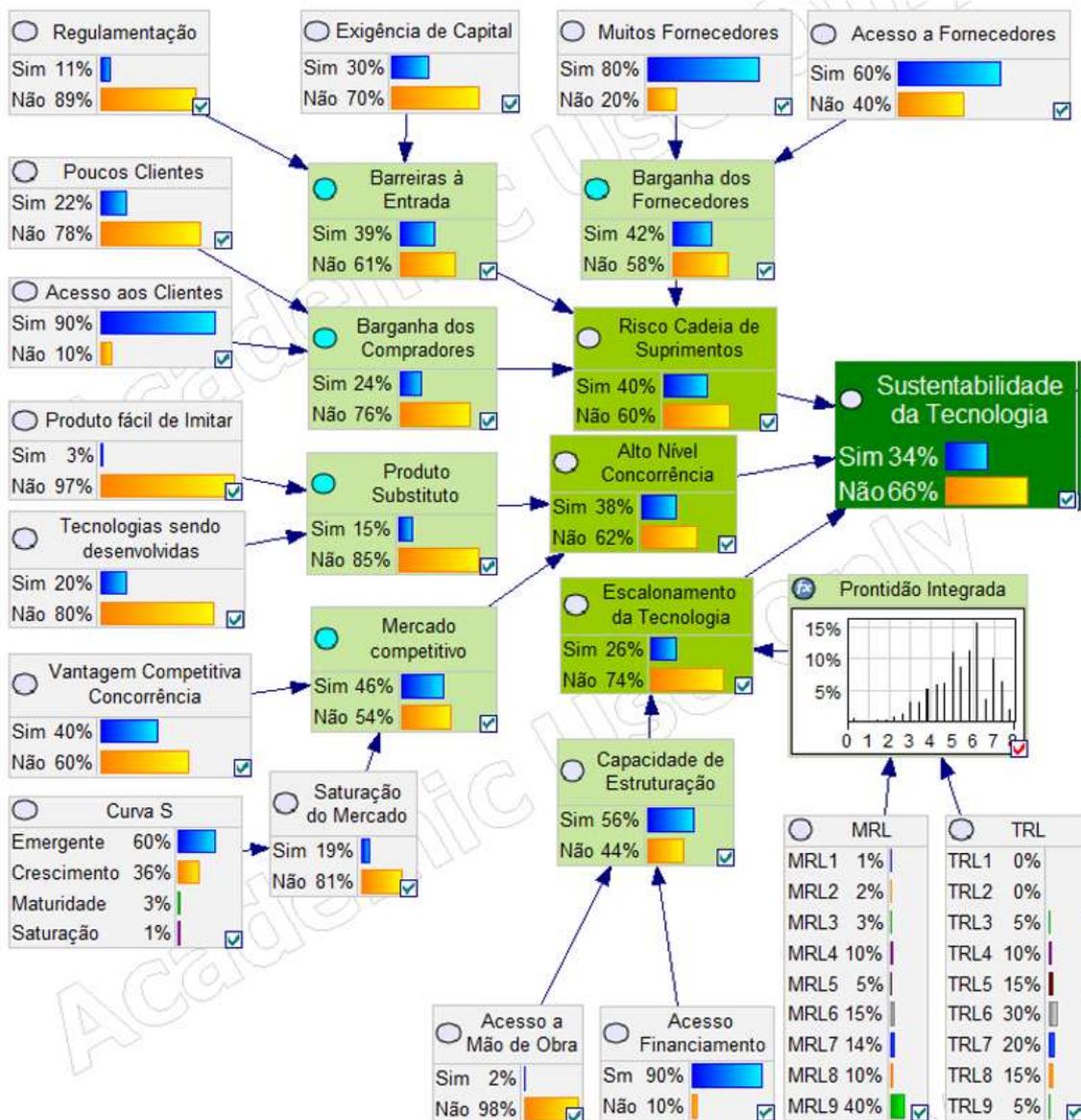


Figura 22 Grafo acíclico da Sustentabilidade da Tecnologia.

Fonte: Elaboração própria (2020)

Dando seguimento à explicação das variáveis relativas a dimensão ST, a Tabela 14 detalha os critérios probabilísticos e as respectivas descrições de cada nó da variável *Sustentabilidade da Tecnologia* e das variáveis que influenciam diretamente a mesma: *Risco Cadeia de Suprimentos*, *Alto Nível de Concorrência* e *Escalonamento da Tecnologia*. Estas variáveis podem ser estimadas durante aplicação do modelo ou valoradas por especialistas (CATLETT, 1991; LIMA, 2014).

Tabela 14 Variáveis da dimensão ST.

	<i>Escal. Tecnologia</i>		Sim		Não					
	<i>Risco Cadeia Suprim.</i>		Sim	Não	Sim	Não				
	<i>Alto Nível Concor.</i>	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não			
Sustentabilidade de da Tecnologia	Sim	25%	60%	65%	95%	1%	10%	20%	40%	
	Não	75%	40%	35%	5%	99%	90%	80%	60%	
<b>Descrição:</b> variável do tipo booleana que representa a dimensão Sustentabilidade da Tecnologia e é afetada, a priori, pelas variáveis <i>Escalonamento da Tecnologia</i> e pelas variáveis que consolidam as 5 Forças de Porter ( <i>Risco Cadeia de Suprimentos</i> e <i>Alto Nível de Concorrência</i> ).										
Risco Cadeia de Suprimentos	<i>Barg.Compradores</i>		Sim		Não					
	<i>Barreiras à Entrada</i>		Sim	Não	Sim	Não				
	<i>Barg. Fornecedores</i>	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não			
Sim	95%	80%	85%	60%	60%	40%	30%	5%		
Não	5%	20%	15%	40%	40%	60%	70%	95%		
<b>Descrição:</b> variável do tipo booleana que representa a parte relativa à cadeia de suprimentos das 5 Forças de Porter e é afetada, a priori, pelas variáveis <i>Barganha de Compradores</i> , <i>Barreiras à entrada</i> e <i>Barganha de Fornecedores</i> .										
Alto Nível de Concorrência	<i>Produto Substituto</i>		Sim		Não					
	<i>Mercado Compet.</i>		Sim	Não	Sim	Não				
	Sim	95%	30%	70%	5%					
Não	5%	70%	30%	95%						
<b>Descrição:</b> variável booleana que é afetada, a priori, pelas variáveis <i>Produto substituto</i> e <i>Mercado Competitivo</i> também referentes às 5 Forças de Porter.										
Escalonamento da Tecnologia	<i>Prontidão Integrada</i>		1 -3		4 - 6		7 -8		9	
	<i>Cap. Estruturação</i>		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
	Sim	10%	1%	40%	21%	70%	41%	95%	55%	
Não	90%	99%	60%	79%	30%	59%	5%	45%		
<b>Descrição:</b> variável booleana afetada, a priori, pelas variáveis <i>Prontidão Integrada</i> e <i>Capacidade de Estruturação</i> .										

Fonte: Elaboração Própria (2020)

A Tabela 15 explica as variáveis, a priori, do *Escalonamento da Tecnologia*: *Capacidade de Estruturação*, *Acesso a Financiamento*, *Acesso à Mão de Obra*, *Prontidão Integrada*, *MRL* e *TRL*.

Tabela 15 Variáveis do Escalonamento da Tecnologia.

Capacidade de Estruturação	<i>Acesso a Financiamento</i>		Sim		Não	
	<i>Acesso a Mão de Obra</i>		Sim	Não	Sim	Não
	Sim	90%	60%	40%	10%	
	Não	10%	40%	60%	90%	

	<b>Descrição:</b> variável booleana afetada, a priori, pelas variáveis <i>Acesso a Financiamento</i> e <i>Acesso a Mão de Obra</i> . Ela terá seus valores estimados para fins ilustrativos (HOSSEINI; BARKER, 2016).
Acesso Financiamento	<b>TPN:</b> Sim, Não <b>Descrição:</b> variável booleana a ser estimada durante a aplicação do modelo, fazendo uso da opinião de especialistas (CATLETT, 1991; LIMA, 2014).
Acesso Mão de Obra	<b>TPN:</b> Sim, Não <b>Descrição:</b> variável booleana a ser estimada durante a aplicação do modelo, fazendo uso da opinião de especialistas (CATLETT, 1991; LIMA, 2014).
Prontidão Integrada	<b>TPN:</b> $Readiness\_Level = \text{Truncate}(((MRL+1)*(TRL+1))^{(1/2)})$ <b>Descrição:</b> variável do tipo função que é afetada, a priori, pelas variáveis <i>MRL</i> e <i>TRL</i> conjuntamente. A função <i>Truncate()</i> foi utilizada para garantir que o número seja inteiro.
MRL	<b>TPN:</b> distribuída e estimada entre as categorias da variável, isto é do MRL 1 ao MRL 9 (MARLYANA; TONTOWI; YUNIARTO, 2018). <b>Descrição:</b> variável discreta que terão seus valores estimados durante aplicação do modelo. Estes valores devem ser valorados por especialistas (CATLETT, 1991; LIMA, 2014).
TRL	<b>TPN:</b> distribuída e estimada entre as categorias da variável, isto é do TRL 1 ao TRL 9 (ABNT, 2015). <b>Descrição:</b> variável discreta que terá seus valores estimados durante aplicação do modelo. Estes valores devem ser valorados por especialistas (CATLETT, 1991; LIMA, 2014).

Fonte: Elaboração própria (2020)

A Tabela 16 descreve as variáveis *Barganha dos fornecedores*, *Barreiras à Entrada*, *Barganha dos Compradores*, *Produto substituto* e *Mercado competitivo*. Elas terão seus valores estimados para fins ilustrativos (HOSSEINI; BARKER, 2016). Salienta-se que as variáveis *Acesso a Fornecedores*, *Muitos Fornecedores*, *Exigência de Capital*, *Regulamentação*, *Poucos Clientes*, *Acesso aos Clientes*, *Produto fácil de imitar*, *Tecnologias sendo desenvolvidas* e *Vantagem competitiva concorrência* devem ser estimadas por especialistas (CATLETT, 1991; LIMA, 2014).

Para a presente tese, está sendo utilizado o formulário de pesquisa que se encontra no *Apêndice C* para estimar estas variáveis, juntamente com as variáveis *Capacidade de Estruturação*, *Acesso a Financiamento*, *Acesso à Mão de Obra*, *Prontidão Integrada*, *MRL* e *TRL*.

Tabela 16 Variáveis das Cinco Forças de Porter.

	<i>Acesso a Fornecedores</i>		Sim		Não	
	<i>Muitos Fornecedores</i>		Sim	Não	Sim	Não
Barganha de fornecedores	Sim	10%	60%	70%	90%	
	Não	90%	40%	30%	10%	
<b>Descrição:</b> variável booleana afetada a priori pelas variáveis <i>Acesso a Fornecedores</i> e <i>Muitos Fornecedores</i> .						
	<i>Regulamentação</i>		Sim		Não	
	<i>Exigência de Capital</i>		Sim	Não	Sim	Não
Barreiras à Entrada	Sim	90%	60%	70%	20%	
	Não	10%	40%	30%	80%	
<b>Descrição:</b> variável booleana que é afetada, a priori, pelas variáveis <i>Regulamentação</i> e <i>Exigência de Capital</i> .						
	<i>Acesso aos Clientes</i>		Sim		Não	
	<i>Poucos Clientes</i>		Sim	Não	Sim	Não
Barganha dos Compradores	Sim	60%	5%	95%	85%	
	Não	40%	95%	5%	15%	
<b>Descrição:</b> Variável booleana que é afetada, a priori, pelas variáveis <i>Poucos Clientes</i> e <i>Acesso aos Clientes</i> .						
	<i>Produto fácil de imitar</i>		Sim		Não	
	<i>Tecnologias sendo desenvolvidas</i>		Sim	Não	Sim	Não
Produto Substituto	Sim	95%	60%	50%	5%	
	Não	5%	40%	50%	95%	
<b>Descrição:</b> variável booleana que é afetada, a priori, pelas variáveis <i>Produto fácil de imitar</i> e <i>Tecnologias sendo desenvolvidas</i> .						
	<i>Saturação do Mercado</i>		Sim		Não	
	<i>Vantagem competitiva concorrência</i>		Sim	Não	Sim	Não
Mercado competitivo	Sim	95%	70%	80%	10%	
	Não	5%	30%	20%	90%	
<b>Descrição:</b> variável booleana afetada, a priori, pelas variáveis <i>Saturação de Mercado</i> e <i>Vantagem competitiva concorrência</i> .						
Saturação do Mercado	<b>TPN</b>	Curva S	Emergente	Crescimento	Maturidade	Saturação
		Sim	10%	30%	60%	90%
		Não	90%	70%	40%	10%
<b>Descrição:</b> variável discreta afetada, a priori, pela variável <i>Curva S</i> que será explicada em seguida.						

Fonte: Elaboração própria (2020)

Para a variável discreta *Curva S* que é segmentada em emergente, crescimento, maturidade e saturação, propõe-se a utilização de modelagem matemática a fim de completar algumas lacunas apresentadas na literatura: identificação de pontos de transição entre as etapas na curva (WILDER et al., 2016; XIUXU et al., 2015) e utilização avançadas de amortecimentos e previsão como curvas de

crescimento (DE GOOIJER; HYNDMAN, 1982; WILDER et al., 2016; XIN'AN; AIJUN, 2016).

O ponto de partida da metodologia são as patentes acumuladas ano a ano, de acordo com cada uma das tecnologias selecionadas, seguindo o modelo da Curva S, apresentados no item 2.4.2 e descrito por (GAO et al., 2013). Do ponto de vista estatístico, o passo a passo escolhido para a análise e avaliação da TLC segue referências consolidadas de estudos de (KABACOFF, 2011; KRISPIN, 2019; SMITH, 2014): coleta de dados, desenvolvimento de modelos e comparação entre eles.

A etapa de **coleta de dados** foi realizada com o acesso a base de dados de patentes globais, como a Global Patent Data Collection (DERWENT-INNOVATION, 2019) e, através do uso de palavras-chave das diferentes tecnologias que estarão em avaliação, coleta-se a lista de patentes por ano. Estas palavras-chave representam as diferentes formas como as tecnologias de interesse podem ser identificadas nos documentos. Sugere-se que a pesquisa contemple a busca dos termos selecionados no título, resumo e reivindicações dos documentos de patentes. É importante ressaltar que os bancos de dados de patentes têm um período de restrição de acesso de 18 meses que antecede a publicação completa de uma patente na maioria dos países (WIPO, 2015).

Já para o **desenvolvimento do modelo**, no presente estudo foram elaborados algoritmos no ambiente R Studio (TEAM, 2019) para importar os dados, criar gráficos e análises. A Tabela 17 mostra os métodos usados neste estudo que fez uso do *growthcurves 0.8.1* (PETZOLDT, 2019), que inclui modelos de curvas de crescimento não linear com quantidades variáveis de parâmetros escritos como uma solução analítica da equação diferencial. Para (KAUFMANN, 1981), as curvas de crescimento são técnicas empíricas utilizadas para a previsão da evolução de quantidades ao longo do tempo e têm sido aplicadas para estudos nas mais diversas áreas da ciência. A escolha pelas curvas de crescimento também decorre do fato de que o conceito da curva S se origina da curva de crescimento logística (GAO et al., 2013; MADVAR et al., 2016).

A escolha do R Studio é em função dele ser uma plataforma aberta e gratuita com grande quantidade de pacotes que contemplam as mais diversas

ferramentas estatísticas, desde as mais simples, chegando as mais complexas que utilizam aprendizado de máquina (KRISPIN, 2019).

Tabela 17 Modelos de curvas de crescimento.

Tipo	Modelo	Descrição
Curvas de crescimento	Logística	Modelo clássico de curvas de crescimento de três parâmetros (PHILLIPS, 2007) usado para estudar e prever mudanças futuras (KUCCHARAVY; DE GUIO, 2015)
	Gompertz	Originalmente utilizada para estimar a mortalidade humana e que possui três parâmetros. Ela pode ser escrita de diferentes formas, incluindo a possibilidade de quatro parâmetros (CONSERVATION, 2006).
	Richards	Uma generalização da curva logística, cujo ponto de inflexão não é mais simétrico. Possui quatro parâmetros (CONSERVATION, 2006)
	Exponencial	Curva de crescimento clássica com dois parâmetros (CONSERVATION, 2006).

Fonte: Elaboração própria (2020)

Para suplantarmos a lacuna de obtenção dos pontos de inflexão da curva, foram utilizados os conceitos matemáticos das derivadas, por meio da aplicação de métodos matemáticos, para obter os pontos de inflexão da mesma, determinando as divisões entre os estágios de maturidade. A segunda derivada é a ideia fundamental para a inflexão central ou mudança na concavidade da curva. Quando a 2ª derivada de uma determinada função é igual a zero, significa que, neste ponto, há uma inflexão de sua concavidade (DA COSTA; GUERRA, 2009).

- Seja  $f$  uma função derivada de até 2ª ordem no intervalo  $I$  e suponha que em  $x_0 \in I, f''(x_0) \neq 0$ . Nesse caso, se  $f''(x_0) > 0$ , o gráfico de  $f$  tem uma concavidade positiva em  $x_0$  e se, o gráfico de  $f''(x_0) < 0$  tem uma concavidade negativa em  $x_0$ ; e
- Seja  $f$  uma função derivada de até 2ª ordem em um intervalo  $I$  e suponha que  $x_0 \in I$  é a abscissa de um ponto de inflexão no gráfico de  $f$ . Portanto,  $f''(x_0) = 0$ .

Para os outros pontos de inflexão, utilizou-se o conceito da 3ª derivada, que também é aplicado na física e é conhecido como Jerk. O tempo de variação da taxa de aceleração é chamado de Jerk e é essencial em aplicações mecânicas e acústicas, como vibração e impacto. A terceira derivada é a taxa de variação da inclinação. Quando é zero, a segunda derivada é constante e a taxa de

variação da inclinação é fixa (SCHOT, 1978)]. Desta forma, são obtidos três pontos de inflexão, gerando a divisão da curva S em quatro fases, conforme esperado.

A etapa de **comparação entre modelos** foi realizada de acordo com as seguintes etapas (GAO et al., 2013):

1. Seleção do modelo de melhor suavização de curvas de crescimento;
2. Verificação se os modelos são estatisticamente robustos, utilizando medidas de acurácia e qualidade da informação, com base no princípio da parcimônia. Para tanto serão utilizados os seguintes parâmetros: raiz quadrática do erro médio (root mean square error - RMSE), valores do critério de informação de Akaike (AIC) e o coeficiente de determinação (HUANG, 2008; WILDER et al., 2016). O AIC considera o número de parâmetros dos modelos, penalizando os modelos com mais parâmetros, de acordo com a parcimônia (BOZDOGAN, 1987);
3. Elaboração da fórmula da melhor opção, utilizando os parâmetros encontrados no R Studio;
4. Determinação dos pontos de inflexão das curvas com a utilização de derivadas segunda e terceira ordem, conforme explorado acima;
5. Definição das quatro fases da Curva S: emergente, crescimento, maturidade e saturação.
6. Discretização da variável *Curva S* e a variável *Saturação do Mercado* descrita na Tabela 16.

### 3.5. DIMENSÃO CONFIABILIDADE

Para mensuração da confiabilidade em fases iniciais de desenvolvimento de produto ou tecnologia, poderão ser utilizadas as ferramentas que estão descritas na Figura 11 do capítulo 2.4. Para fins do presente estudo, estará sendo selecionado um projeto que tenha dados de testes de forma que seja possível mensurar valores de confiabilidade, mesmo que de forma preliminar. Em situações em que não existam dados, o modelo poderia ser adaptado para utilizar outras técnicas, como por exemplo, FMEA para avaliação da confiabilidade (LIU et al., 2019).

Desta forma, as etapas aqui descritas contemplaram as limitações acima descritas para o escopo específico deste estudo. O grafo acíclico direcionado da dimensão confiabilidade, representado pela Figura 23, mostra que a variável *Confiabilidade* depende da *Estimativa da Confiabilidade*, que pode variar em função da variável *Tempo de Interesse*. Já a Tabela 18 descreve os critérios probabilísticos de cada nó da Figura 23.

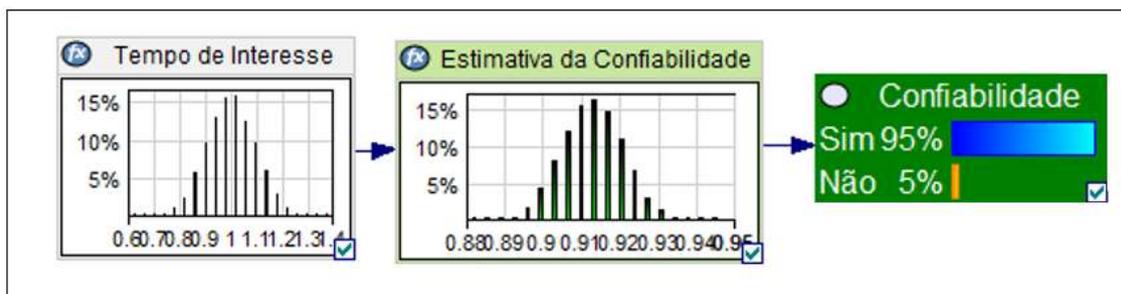


Figura 23 Grafo acíclico da dimensão Confiabilidade.

Fonte: Elaboração própria (2020)

Tabela 18 Variáveis da dimensão Confiabilidade.

	TPN	De 0 a 0,3	>0,03 – 0,5	> 0,5 a 0,7	> 0,7 a 0,9	> 0,9 a 1
	Sim	25%	45%	65%	85%	95%
	Não	75%	55%	35%	15%	5%
Confiabilidade	<b>Descrição:</b> A probabilidade posterior referente a variável <i>Confiabilidade</i> da dimensão <i>Confiabilidade</i> depende do <i>Estimativa da Confiabilidade</i> e da sua respectiva discretização. Sugere-se que esta pré-discretização seja realizada a partir dos requisitos do projeto ou opinião de especialistas (CATLETT, 1991; LIMA, 2014). Para fins desta tese, foram criadas faixas ilustrativas (HOSSEINI; BARKER, 2016), conforme descrito no TPN acima.					
	<b>TPN:</b> $Conf\_cal = Exp(-\alpha * Tempo)$					
Estimativa da Confiabilidade	<b>Descrição:</b> Como visto na seção 2.2.2, diferentes distribuições de probabilidade podem ser aplicadas ao estudo da confiabilidade (BIROLINI; DHILLON; BIROLINI, 2017; JIANG, 2015; MAZZUCHI; SOYER, 2003; SALES FILHO et al., 2017). Para fins de exemplificação, será considerada a distribuição exponencial, cuja característica principal é a taxa de falha constante (BIROLINI; DHILLON; BIROLINI, 2017). No exemplo, <i>Conf_cal</i> , representa a função de confiabilidade estimada (KAPLAN; MEIER, 1958), na qual <i>Tempo</i> se refere ao valor calculado no nó <i>Tempo de interesse</i> e o parâmetro $\alpha$ deve ser determinado a partir dos dados de teste.					
	<b>TPN:</b> Tempo=Normal(tempo, desvio padrão)					
Tempo de Interesse	<b>Descrição:</b> Para fins desta tese, esta variável é considerada contínua e calculada a partir de uma distribuição normal. A fórmula acima requer, portanto, dois inputs a serem estabelecidos pelos especialistas ou pelos requisitos do projeto. São eles: “tempo”, referente ao tempo que se espera que a opção					

avaliada possa durar, e “desvio padrão”, referente a estimativa de desvio padrão desta duração.

Fonte: Elaboração própria (2020)

### 3.6. RESUMO DAS ETAPAS PARA USO DO MODELO

A Figura 24, apresenta as etapas necessárias para aplicar o modelo proposto neste capítulo. Estas etapas são detalhadas nos parágrafos seguintes.

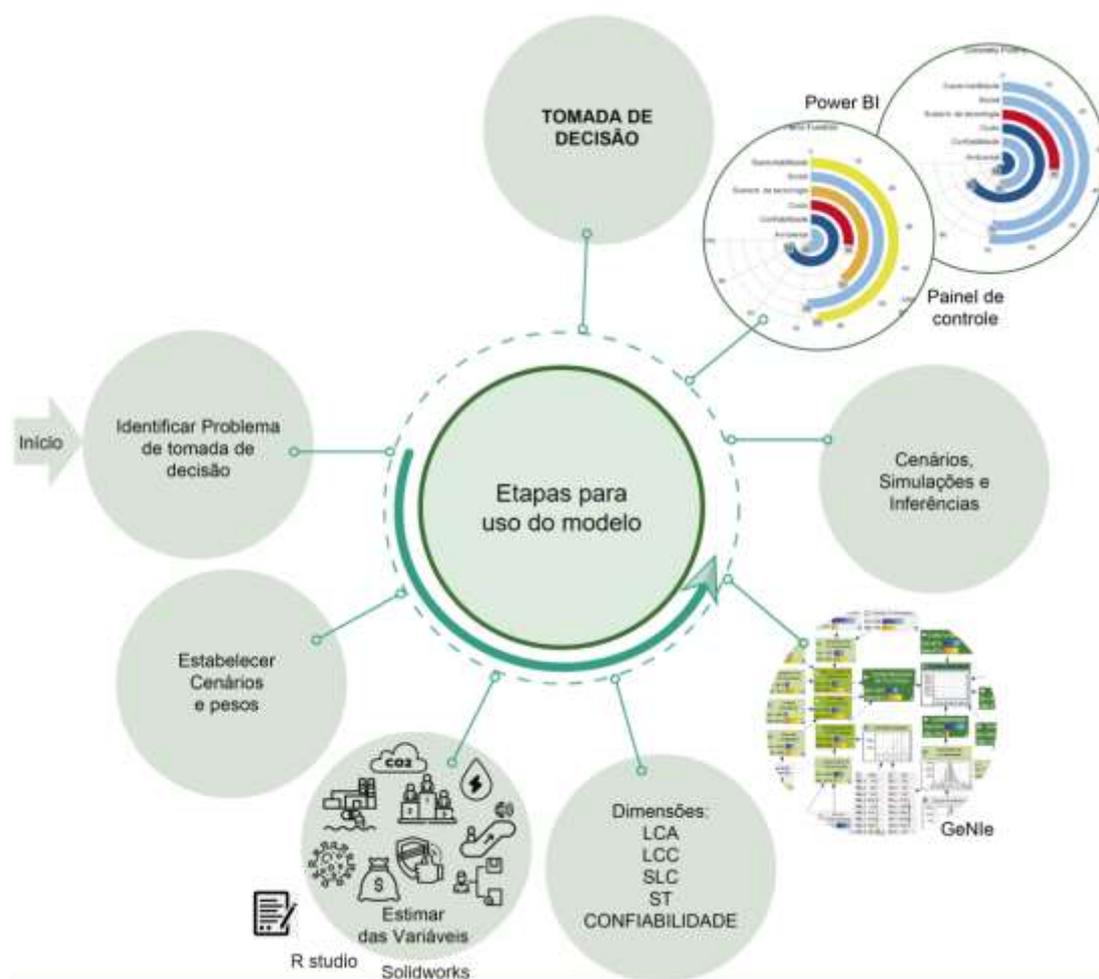


Figura 24 Etapas para utilização do modelo

Fonte: Elaboração própria (2021)

Etapa 1. Identificar o problema envolvido na tomada de decisão, caracterizando as alternativas de escolha e a fase em que o PDP/PDT se encontra. Estabelecer papéis e responsabilidades para a obtenção dos dados, inclusive os especialistas responsáveis no preenchimento das tabelas probabilísticas. Caso estes profissionais não sejam identificados, é possível quantificar diferentes

tabelas de valores. Salienta-se aqui que quanto mais próximo da fase inicial, as informações tendem a ser mais incertas ou, até mesmo, difíceis de serem obtidas. Sugere-se que, mesmo nestes casos, possam ser estimadas e aplicadas ao modelo. Desta forma, à medida que o projeto avance, estes dados possam ser melhor estimados para uma melhor assertividade no processo de tomada de decisão;

Etapa 2. Nomear os **Cenários Externos** e definir, com opinião de especialistas, as respectivas probabilidades. Estes cenários externos devem ser elaborados a partir da estratégia da empresa e associados a uma visão temporal de médio e longo prazo. Definir os **Pesos** de cada dimensão correspondente a cada cenário externo, completando a Tabela 7;

Etapa 3. Estimar as variáveis de cada dimensão:

Atividade 3.1. Realizar as estimativas médias das variáveis da **dimensão ambiental**: *Acidificação ar - kg SO<sub>2</sub>e, Eutrofização Água - kg PO<sub>4</sub>e, Pegada de CO<sub>2</sub>e – Kg e Energia – MJ* a partir das metodologias existentes de LCA, como: TRACIS, CML e IMPACT2002+ (LANDIS; THEIS, 2008);

Atividade 3.2. Realizar as estimativas da variável Histograma do Custo Unitário – R\$, da **dimensão custo**, fazendo uso das técnicas existentes de LCC, como fluxo de caixa (DHILLON, 2010);

Atividade 3.3. Calcular as taxas de acidentes de trabalho com afastamento, de acordo com a equação (4) para os dois últimos anos para encontrar a variável *Taxa de Acidentes* da **dimensão social**;

Atividade 3.4. Estimar a taxa de número de casos Covid 19 por milhão de habitantes para encontrar a variável *Casos Covid 19 dia / MM*, também referente a **dimensão social**;

Atividade 3.5. Realizar a pesquisa referente a **dimensão Sustentabilidade da Tecnologia**, utilizando o formulário do apêndice C para obtenção dos valores das variáveis *Acesso a Fornecedores, Muitos Fornecedores, Exigência de Capital, Regulamentação, Poucos Clientes, Acesso aos Clientes, Produto fácil de imitar, Tecnologias sendo*

*desenvolvidas, Vantagem competitiva concorrência, Acesso a Financiamento, Acesso a Mão de Obra, MRL e TRL;*

Atividade 3.6. Identificar o nível de maturidade da tecnologia, também associada à **dimensão Sustentabilidade da Tecnologia**, amparado nos conceitos do TLC e da Curva S (LITTLE, 1981), utilizando a proposta de modelo que será apresentado no capítulo 4.1.4;

Atividade 3.7. Definir, para a **dimensão confiabilidade**, o valor da variável *Tempo de Interesse* e estimar a fórmula ou valor da variável *Confiabilidade* para o referido tempo. Poderão ser utilizadas as diversas ferramentas de mensuração da confiabilidade, sejam elas quantitativas ou qualitativas, de acordo com os dados disponibilizados no projeto (AZARKHAIL; MODARRES, 2012);

Etapa 4. Revisar e validar, com a opinião de especialistas, as TPN (tabela probabilística de nós) das demais variáveis de cada **dimensão**;

Etapa 5. Preencher o modelo no software GeNie (BAYESFUSION, 2020; DRUZDZEL, 1999) com os dados acima coletados;

Etapa 6. Realizar as simulações, inferências e estudos de cenários distintos, consolidando os dados e resultados em tabelas ou gráficos comparativos.

Etapa 7. Sintetizar os dados obtidos nas simulações no painel de controle desenvolvido.

Etapa 8. Realizar a seleção da opção ou alternativa mais adequada de acordo com os critérios, valores, pesos estimados, assim como as simulações e inferências realizadas.

#### **4. APLICAÇÃO DO MODELO: PROJETO CONCRETO POLIMÉRICO**

A partir do modelo proposto, o presente capítulo tem como objetivo apresentar os resultados da aplicação em um projeto de PD&I com intuito de avaliá-lo. Para isto, inicialmente, foram seguidas as etapas propostas no Capítulo 3 e, ao final, são apresentados alguns cenários que corroboram para a tomada de decisão.

Desta forma, foi escolhido um projeto que tivesse seus dados disponíveis para realização das simulações e comparações previstas. Conforme o objetivo do presente estudo, o projeto deveria estar em fases iniciais de PDP ou do PDT com pelo menos duas opções. Desta forma, é possível simular o processo de tomada de decisão para selecionar a mais adequada dentre as opções.

**Etapa 1.** Selecionado o projeto **PROJETO CONCRETO POLIMÉRICO**, tendo o mesmo sido concluído em 2018 (CIMATEC, 2018). O referido projeto teve como objetivo apresentar um estudo informacional e o desenvolvimento de uma formulação de concreto polimérico, bem como o projeto de três tampas modelos e a metodologia para fabricação destas em concreto polimérico (CIMATEC, 2018). Partiu-se das informações e dados extraídos do data book do projeto, como também dos dados de testes registrados nas bancadas de testes. Verificou-se, também, a necessidade de se realizar o levantamento de dados adicionais, conforme serão descritos a seguir.

A Figura 25 apresenta o *Modelo Referência* que é produzido com a matéria prima **ferro fundido** (FF) e o *Modelo Proposto* que propõe utilizar o **concreto polimérico** (CP) em substituição. Portanto, neste capítulo, é realizada a comparação entre o modelo atual em ferro fundido e o proposto em concreto polimérico.

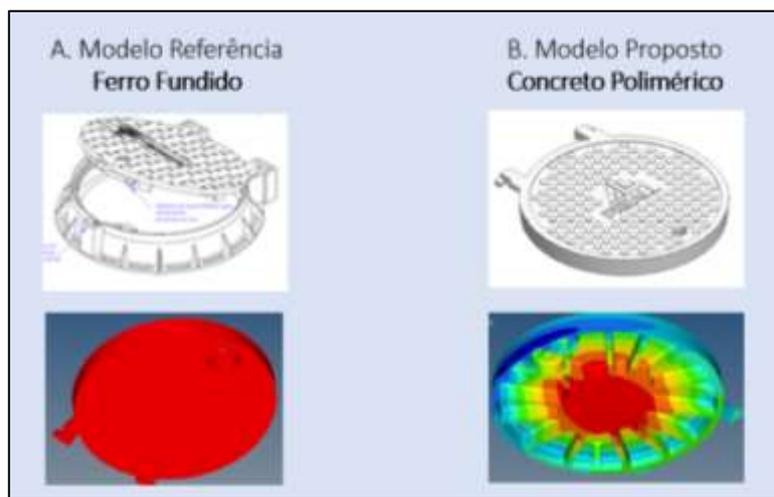


Figura 25 Projeto Concreto Polimérico.

Fonte: Elaboração Própria - (CIMATEC, 2018)

**Etapa 2.** Nomear cenários e estimar as probabilidades dos cenários externos que, para fins ilustrativos, serão consideradas com os seguintes valores: Velho\_Normal (20%), Sem\_Vacina (25%) e Novo\_Normal (55%).

**Etapa 3.** Definição dos pesos que para fins ilustrativos da presente tese eles estão estabelecidos na Tabela 7. Cálculo das das estimativas das variáveis de cada dimensão. Este conjunto de atividades estão descritos no capítulo 4.1 MENSURAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO MODELO.

**Etapa 4.** Revisar cada TPN, que foram estimadas para fins ilustrativos da presente tese.

**Etapa 5.** Preenchimento dos dados no modelo, com a criação de dois arquivos distintos. Um para a opção em CP e outro para a opção em FF.

**Etapa 6.** Realização das simulações, através da utilização dos cenários e inferências. Esta etapa é detalhada no capítulo 4.2.1 Cenários e inferências.

**Etapa 7.** Elaborar o painel de controle com a criação de gráficos comparativos

**Etapa 8.** Seleção da opção mais adequada de acordo com os critérios estabelecidos e simulações realizadas. Esta etapa está sintetizada no capítulo 4.2.2 Quadro resumo das simulações.

## 4.1. MENSURAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO MODELO

### 4.1.1. Dimensão Ambiental

Particularmente para este trabalho, para estimar as variáveis da dimensão ambiental foi utilizada a plataforma GaBi citada anteriormente (ORMAZAL, MARTA JACA, CARMEN PUGA-LEAL, 2014) e que está embarcada no *software* SolidWorks® particularmente na aplicação SolidWorks Sustainability®. Estas simulações são possíveis, visto que as opções FF e CP foram modeladas no referido *software*.

Com a utilização da metodologia proposta no capítulo 3.1, foram obtidos os valores das variáveis ambientais expostos na Tabela 19 e realizado o preenchimento da fórmula estabelecida a partir da fórmula apresentada na

Tabela 11. Os valores da média, conforme descrito na metodologia da capítulo 3.1 são os valores calculados no SolidWorks Sustainability® a partir dos modelos originais do projeto (CIMATEC, 2018).

Tabela 19 Variáveis da LCA - Ferro Fundido e Concreto Polimérico.

<b>Ferro Fundido</b>		
Variável	Valor	Fórmula
Energia total consumida – MJ	4600	$En=Triangular(51\% * 4600, 4600, 168\% * 4600)$
Pegada Carbono – kg CO <sub>2</sub> e	550	$CO2e=If(Cenários\_Externos="Velho\_Normal", Triangular(51\% * 550, 550, 168\% * 550), 96\% * Triangular(51\% * 550, 550, 168\% * 550))$
Acidificação do ar – kg SO <sub>2</sub> e	1,1	$SO2e=Triangular(62\% * 1.1, 1.1, 155\% * 1.1)$
Eutrofização Água - kg PO <sub>4</sub> e	0,335	$PO4e=Triangular(64\% * 0.335, 0.335, 157\% * 0.335)$
<b>Concreto Polimérico</b>		
Variável	Valor	Fórmula
Energia – MJ	1800	$En=Triangular(51\% * 1800, 1800, 168\% * 1800)$
Pegada Carbono – kg CO <sub>2</sub> e	100	$CO2e=If(Cenários\_Externos="Velho\_Normal", Triangular(51\% * 100, 100, 168\% * 100), 96\% * Triangular(51\% * 100, 100, 168\% * 100))$
Acidificação ar - kg SO <sub>2</sub> e	0,233	$SO2e=Triangular(62\% * 0.223, 0.223, 155\% * 0.223)$
Eutrofização Água - kg PO <sub>4</sub> e	0,042	$PO4e=Triangular(64\% * 0.042, 0.042, 157\% * 0.042)$

Fonte: Elaboração Própria (2020)

Em seguida calculou-se os extremos para estabelecer os limites de distretização, conforme Tabela 20, na qual o máximo foi representado pelo valor do FF e o mínimo pelo CP.

Tabela 20 Limites superiores e inferiores das TPN.

Variável	Extremos
Energia total consumida – MJ	Máximo = 168%*4600, portanto o Máximo = 7728 Mínimo = 51%*1800, portanto o Mínimo = 918
Pegada Carbono – kg CO <sub>2</sub> e	Máximo = 168% * 550, portanto o Máximo = 924 Mínimo = 96%*51%*100, portanto o Mínimo = 48,96
Acidificação do ar – kg SO <sub>2</sub> e	Máximo = 155%*1,1, portanto o Máximo = 1,705

	Mínimo = 62% * 0,223, portanto o Mínimo = 0,13826
Eutrofização Água - kg PO4e	Máximo = 157% * 0,335, portanto o Máximo = 0,52595
	Mínimo = 64% * 0,042, portanto o Mínimo = 0,02688

Fonte: Elaboração Própria (2020)

#### 4.1.2. Dimensão Custo

Com a metodologia proposta no item 3.2 e fazendo uso da simulação no LCC do *Solidworks*<sup>®</sup>, por meio da ferramenta *GaBi*, obtêm-se o custo unitário (R\$ / peça) no seu ciclo de vida (GABI, 2019). Como os dados dos projetos não podem ser divulgados, os valores apresentados na Tabela 21 são fictícios, no entanto, guardam a proporcionalidade entre as duas opções.

Tabela 21 Histograma do Custo Unitário – R\$.

Opção	Valor (M <sub>1</sub> )	Fórmula
Ferro Fundido	R\$ 149,85	Custo= If(Cenários_Externos="Sem_Vacina", Triangular((1-30%)*149.85*1.3, 149.85*1.3,(1+50%)*149.85*1.3), Triangular((1-30%)*149.85, 149.85,(1+50%)* 149.85))
Concreto Polimérico	R\$ 57,70	Custo= If(Cenários_Externos="Sem_Vacina", Triangular((1-30%)*57.70*1.3, 57.70*1.3,(1+50%)*57.70*1.3), Triangular((1-30%)*57.70, 57.70,(1+50%)*57.70))

Fonte: Elaboração Própria (2020)

Por fim, realizou-se os cálculos dos extremos no modelo para estabelecer os limites de distretização. Conforme verificado na Tabela 21, o máximo será representado pelo valor do Ferro Fundido e o mínimo pelo Concreto Polimérico, conforme cálculo abaixo:

*Máximo* = (1 + 50%) \* 149,85, portanto *Máximo* = R\$ 224,78, e o

*Mínimo* = ((1 – 30%) \* 57.70), portanto *Mínimo* = R\$ 40,39.

### 4.1.3. Dimensão Social

Para a dimensão social, seguiu-se a metodologia estabelecida no item 3.3 para obtenção das taxas de acidentes de trabalho com afastamento, conforme a Tabela 22.

Tabela 22 Taxa de acidentes com afastamento.

Segmento	2015	2016	Tx_acidentes
Indústria de produtos minerais não metálicos	0,41%	0,38%	Tx_acidentes= If (Bernoulli(0.5)=0, 0,41%, 0,38%)
Indústria metalúrgica	0,41%	0,37%	Tx_acidentes= If (Bernoulli(0.5)=0, 0,41%, 0,37%)

Fonte: Elaboração Própria (DIEESE, 2016; FAZENDA, 2017)

Para o cálculo da fórmula estabelecida na Tabela 13, particularmente para a variável Casos 19 dia / MM, tem-se na Tabela 23 a referência para a parametrização, cujos dados foram obtidos no sítio do ECDC – European Centre for Disease Prevention and Control, criando faixas de criticidade (ECDC, 2020).

Tabela 23 Casos Covid 19 dia / MM.

Casos Covid 19 dia / MM	Casos_Covid_19 = If(Cenários_Externos = "Sem_Vacina", Normal(304.3,108.7), Normal(141.5, 108.7))
-------------------------	--

Fonte: Elaboração própria (2020)

### 4.1.4. Dimensão Sustentabilidade da Tecnologia

Conforme descrito no item 3.4, as variáveis *Acesso a Fornecedores*, *Muitos Fornecedores*, *Regulamentação*, *Exigência de Capital*, *Poucos Clientes*, *Acesso aos Clientes*, *Produto fácil de imitar*, *Tecnologias sendo desenvolvidas*, *Vantagem competitiva concorrência*, *Acesso a Financiamento*, *Acesso Mão de Obra*, *Nível de Prontidão Integrada*, *MRL* e *TRL* devem ser estimadas por especialistas (CATLETT, 1991; LIMA, 2014). Desta forma, foi elaborado um formulário e enviado para os especialistas envolvidos no projeto e representantes da empresa. Com o objetivo de garantia de confidencialidade, as respostas foram anônimas. O referido formulário encontra-se no apêndice C deste trabalho. A Tabela 24 exhibe os resultados diretos que foram obtidos através da referida pesquisa.

Tabela 24 Estimativas de TRL e MRL.

Tecnologia	Ferro fundido		Concreto polimérico	
	Nível	TRL	MRL	TRL
1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
3	0,0%	0,0%	0,0%	16,67%
4	0,0%	0,0%	33,33%	33,33%
5	0,0%	0,0%	16,67%	33,33%
6	0,0%	0,0%	16,67%	0,00%
7	0,0%	0,0%	16,67%	0,00%
8	16,7%	16,7%	16,66%	16,67%
9	83,3%	83,3%	0,00%	0,00%

Fonte: Elaboração Própria (2020)

Por outro lado, na Tabela 25 foram calculados considerando as quatro opções do formulário de pesquisa: Não, Provável que Não, Provável que sim e Sim. As Equações (5) e (6) foram consideradas, já que as variáveis descritas na tabela são variáveis Booleanas:

$$- \text{Não: } Prob.(\text{Não}) = \text{Não} + 80\% * \text{Provável que Não} + 20\% * \text{Provável que Sim}; \quad (5)$$

$$- \text{Sim: } Prob.(\text{Sim}) = 1 - Prob.(\text{Não}). \quad (6)$$

Tabela 25 Variáveis a priori da ST.

Variável	Ferro Fundido		Concreto Polimérico	
	Não	Sim	Não	Sim
Acesso a Financiamento	16,67%	83,33%	6,67%	93,33%
Acesso a Mão de Obra	16,67%	83,33%	6,67%	93,33%
Vantagem Competitiva Concorrência	26,67%	73,33%	26,67%	73,33%
Tecnologias sendo desenvolvidas	3,33%	96,67%	33,33%	66,67%
Produto fácil de imitar	6,67%	93,33%	43,34%	56,66%
Acesso aos Clientes	3,33%	96,67%	6,67%	93,33%
Poucos Clientes	70,00%	30,00%	70,00%	30,00%
Regulamentação	66,66%	33,34%	66,66%	33,34%
Exigência de Capital	16,67%	83,33%	60,00%	40,00%
Muitos Fornecedores	16,67%	83,33%	23,34%	76,66%
Acesso aos Fornecedores	10,00%	90,00%	16,67%	83,33%

Fonte: Elaboração Própria (2020)

Para a variável Curva S, foram seguidas as etapas escolhidas para a análise e avaliação da TLC, seguindo referências consolidadas de estudos estatísticos (KABACOFF, 2011; KRISPIN, 2019; SMITH; AGRAWAL, 2014) (KABACOFF, 2011; KRISPIN, 2019; SMITH, 2014): coleta de dados, desenvolvimento de

modelos e comparação entre eles com utilização de métodos de suavização utilizando curvas de crescimento, já que a origem a base teórica das curvas S são baseadas nas mesmas (GAO et al., 2013; KUCHARAVY; DE GUIO, 2011).

Para a etapa de **coleta de dados**, obteve-se os dados de patentes globais, com acesso em 17/10/2020 (DERWENT-INNOVATION, 2019) através do uso de palavras-chave das diferentes tecnologias. É importante destacar que os bancos de dados de patentes podem ter um período de restrição de acesso de 18 meses que antecede a publicação completa de uma patente na maioria dos países (WIPO, 2015). As combinações utilizadas são a que seguem:

- **Ferro Fundido:** (AY>=(1900) AND AY<=(2020)) AND (AB=(grey adj cast adj iron) AND AB=((sewer adj grate) or (drain adj cover) or manhole or (shaft adj cover\*) or cover)); e
- **Concreto Polimérico:** (AY>=(1900) AND AY<=(2020)) AND AB=("polymer resin" or "polymer" or epoxi or polyester) AND AB=(concrete) AND AB=((sewer adj grate) or (drain adj cover) or manhole or (shaft adj cover\*) or cover);.

A partir dos dados acima coletados, partiu-se para a etapa de **desenvolvimento do modelo**, com o uso do algoritmo desenvolvido ambiente R Studio (TEAM, 2019) e que se encontra no apêndice B. Com os mesmos, foi possível importar as informações das 194 patentes do ferro fundido e das 2455 patentes do concreto polimérico. Conforme pode ser verificado na Tabela 26, tanto para o FF, quanto para o CP, a curva logística apresentou os melhores resultados para todos os indicadores.

Tabela 26 Métricas para seleção de modelo.

Modelo	(A) Ferro Fundido			(B) Concreto Polimérico		
	R <sup>2</sup>	RMSE	AIC	R <sup>2</sup>	RMSE	AIC
<b>Logística</b>	<b>0,9958</b>	<b>3,38</b>	<b>179,5</b>	<b>0,9969</b>	<b>39,2</b>	<b>336,3</b>
Exponencial	0,9956	3,50	179,3	0,9918	64,4	362,9
Richards	0,9955	3,52	183,5	0,9952	48,7	350,8
Gompertz	0,9935	4,42	193,6	0,9886	77,7	375,6

Fonte: Elaboração Própria (2020)

A partir deste ponto, estabelece-se as curvas e seus respectivos pontos de inflexão, com o uso das equações (7) e (8) obtidas a partir do algoritmo desenvolvido, utilizando os parâmetros da curva logística.

$$\text{- Ferro fundido: } Patentes(t) = \frac{1316,8}{(1,018 + 1292,1 * e^{(-0,089 * t)})}; \quad (7)$$

$$\text{- Concreto polimérico: } Patentes(t) = \frac{20176,0}{(4,32 + 4667,3 * e^{(-0,1081 * t)})}. \quad (8)$$

Seguindo os conceitos explanados no item 3.4, foram realizados os cálculos da 2ª e 3ª derivadas para cada uma das funções, obtidas as raízes para determinação dos pontos de inflexão e identificadas as quatro fases da curva S. Com estes dados finalizados, foram elaborados os gráficos da Figura 26, sendo Ferro Fundido (A) e Concreto Polimérico (B).

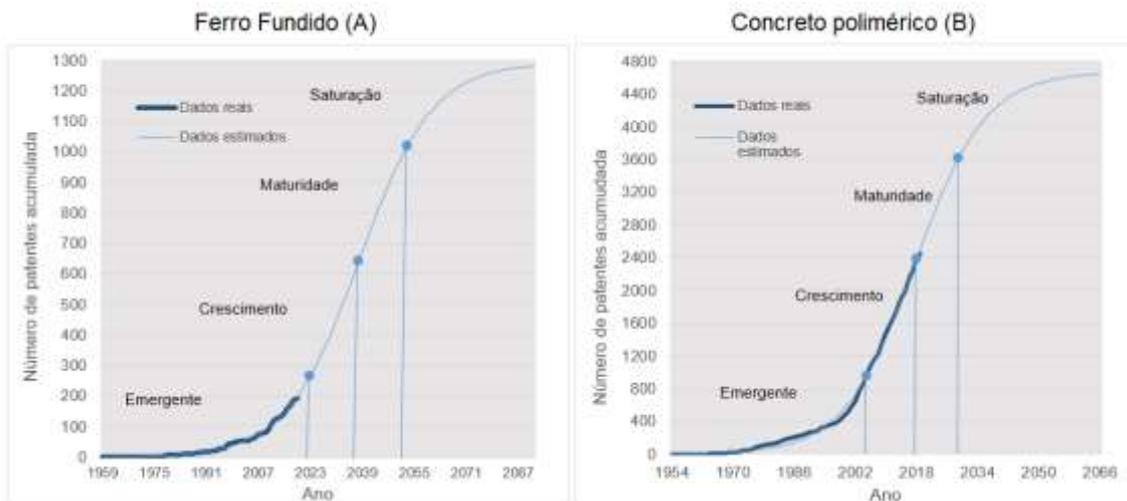


Figura 26 Curvas S estimadas e real.

Fonte: Elaboração Própria (2020)

A última etapa foi a interpretação dos resultados e observa-se que, pela posição que os dados reais se encontram para o Concreto Polimérico (B) na Figura 26, ele está numa transição entre as fases de crescimento e maturidade. De acordo com (GAO et al., 2013; LITTLE, 1981), a fase de maturidade é caracterizada quando uma tecnologia tende a se transformar em tecnologia-chave, sendo integrada a produtos ou processos, além de manter alto impacto competitivo.

Desta forma, abre-se uma importante oportunidade para o concreto polimérico se tornar uma tecnologia-chave.

Em relação ao ferro fundido (B), esperava-se que estivesse nas fases de maturidade ou saturação, pois, conforme (TAKATA, 2002) ele vem sendo substituído por outros materiais, como aço, ferro e plástico, além de apresentar claro declínio com redução do número de empresas. Por outro lado, a posição na curva entre emergente e crescimento pode indicar uma reação do próprio mercado de FF com o objetivo de retomar o seu espaço, através da introdução de novos produtos e processos. Esta visão também é corroborada pelo conceito destas fases na curva S estabelecida por (LITTLE, 1981): uma nova tecnologia com baixo impacto competitivo e baixa integração em produtos ou processos.

Baseado nas análises dos dados e informações da literatura acima descritas, são estimados os valores para a Tabela 27 no modelo. É importante salientar que, para o ferro fundido, o modelo matemático da curva S indica que estaria entre a fase emergente e crescimento, contudo a literatura indica que estaria em declínio. Já na análise do concreto polimérico as duas visões se assemelham. Desta forma, se elaborou uma estimativa que contemplasse estas duas visões, pois a análise matemática não pode ser dissociada da opinião de especialistas (GAO et al., 2013).

Tabela 27 Estimativa da variável Curva S.

	Emergente	Crescimento	Maturidade	Saturação
Ferro Fundido	15%	35%	15%	35%
Concreto Polimérico	5%	30%	60%	5%

Fonte: Elaboração própria (2020)

A partir dos dados estimados acima, juntamente com as informações coletadas na pesquisa descritas no apêndice C, o modelo estima as demais variáveis da dimensão Sustentabilidade da Tecnologia, conforme as tabelas propostas no capítulo 3.4.

#### **4.1.5. Dimensão Confiabilidade**

A partir das metodologias descritas no item 3.5 para estimar a confiabilidade em fases iniciais de projeto e analisar seus dados (O'CONNOR; KLEYNER, 2012),

e, considerando-se que ao analisar o *databook* do projeto CONCRETO POLIMÉRICO (CIMATEC, 2018) comprovou-se que “a escassez de dados é uma característica comumente encontrada durante o PDP” (DROGUETT; MOSLEH, 2006), foi pesquisada a metodologia que pudesse ser empregada para mensurar o seu valor em situações de pouca amostragem. Dessa maneira, consideram O’Connor e Kleyner (2012) que:

Na engenharia de confiabilidade, a análise de dados de probabilidade Weibull é provavelmente a técnica de processamento e interpretação de dados da vida mais amplamente utilizada. Uma das muitas vantagens é a flexibilidade, facilidade de interpretação dos parâmetros de distribuição e sua relação com as taxas de falha (O’CONNOR; KLEYNER, 2012, p.78).

Outros autores também citam a sua flexibilidade para uso em situações de poucos dados amostrais (ERTO; GUIDA, 1985; LU; WANG, 2008; NELSON, 1985; XIA, 2012). Desta forma, a partir dos dados obtidos nos testes amostrais existentes, será desenvolvido o modelo de estimação da confiabilidade utilizando a técnica mencionada, cujo algoritmo encontra-se no apêndice D. Uma ferramenta gráfica bastante recorrente na escolha de possíveis distribuições de probabilidade na modelagem de dados de sobrevivência (ou confiabilidade) é o chamado gráfico do Tempo Total em Teste (ou curva TTT) (AARSET, 1987). Este gráfico é uma condição suficiente, mas não necessária, para indicar comportamento da função de taxas de falha dos tempos observados.

Se o gráfico apresentar o comportamento de uma linha diagonal, diz-se que a taxa de falha é constante. Estas três situações podem ser representadas pela distribuição de Weibull. A Figura 27 indica a representação gráfica do TTT para ambos os tempos de falha. Observa-se que, para os produtos de ferro fundido, o gráfico TTT (painel esquerdo) sugere que a função de taxa de falha é crescente.

Entretanto, para os produtos de concreto polimérico, observa-se que os pontos plotados no gráfico (painel direito) estão muito próximos da reta diagonal, o que indica uma função de taxa de falha constante. Neste caso, a distribuição

exponencial pode ser utilizada na modelagem dos tempos observados, por ser mais simples (isto é, possui apenas um parâmetro) do que a distribuição de Weibull. De fato, a distribuição exponencial é um caso particular da distribuição de Weibull quando o parâmetro de forma assume o valor um.

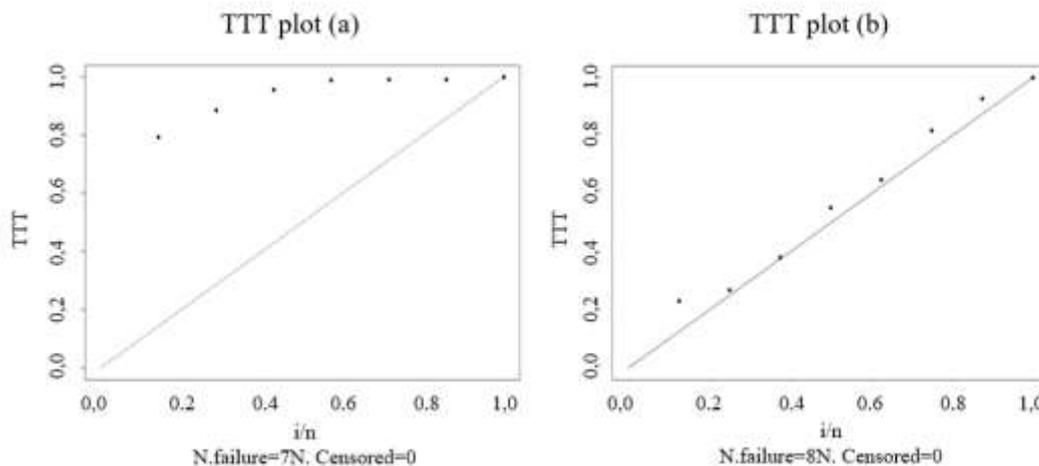


Figura 27 Gráfico TTT para os tempos de falha do ferro fundido (a) e do concreto polimérico (b).

Fonte: Elaboração Própria (CIMATEC, 2018).

Na sequência, pode-se usar o método clássico da máxima verossimilhança, mediante a aplicação da função `fitdist(.)` do pacote “`fitdistrplus`” do *software* estatístico R (RCT, 2018), por exemplo, para a obtenção das estimativas dos parâmetros das distribuições de probabilidade assumidas para os dados de cada tipo de tampa de bueiro. Para fins de comparação, considera-se outras distribuições candidatas, como a log-normal (ferro fundido) e a Weibull (concreto polimérico).

De acordo com os critérios de informação de Akaike (AIC) (AKAIKE, 1974) e de Schwarz (BIC) (SCHWARZ, 1978), o melhor ajuste aos dados das tampas de ferro fundido é o do modelo Weibull ( $AIC_{Weibull} = 17,3811$  vs.  $AIC_{log-normal} = 19,5993$ ;  $BIC_{Weibull} = 17,2730$  vs.  $BIC_{log-normal} = 19,4911$ ), já, para os dados das tampas de concreto polimérico, o modelo exponencial resultou em um melhor ajuste ( $AIC_{exp} = 56,3117$  vs.  $AIC_{Weibull} = 56,9128$ ;  $BIC_{exp} = 56,3911$  vs.  $BIC_{Weibull} = 57,0717$ ).

Portanto, tem-se as seguintes funções de confiabilidade (9) e (10) estimadas:

$$\text{- Ferro fundido: } R(t) = e^{-(t/6,9283)^{13,1758}}, t \geq 0; \quad (9)$$

$$\text{- Concreto polimérico: } R(t) = e^{-0,0912 t}, t \geq 0. \quad (10)$$

Essas curvas de confiabilidade estimadas, bem como aquelas obtidas pelo método não-paramétrico de Kaplan-Meier (KAPLAN; MEIER, 1958), são apresentadas na

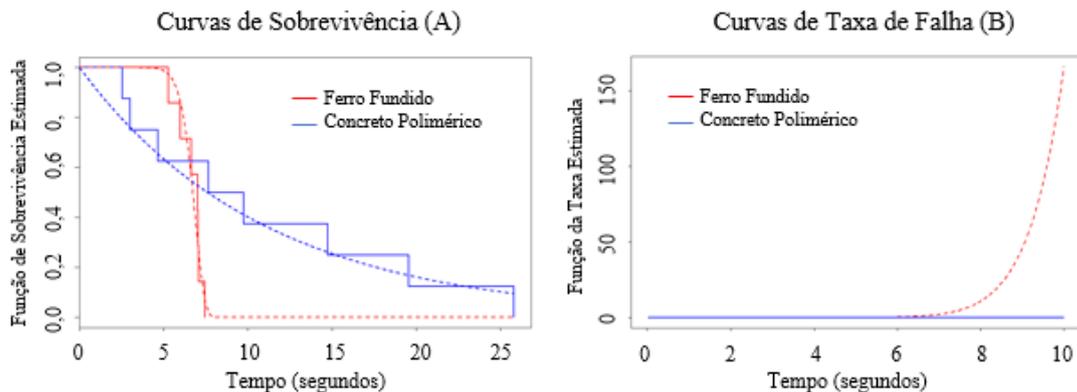


Figura 28 (A): Curvas de confiabilidade estimadas (linhas tracejadas), sobrepostas às estimativas de Kaplan-Meier (linhas contínuas). (B): Curvas de taxa de falha estimadas.

(painel esquerdo). Este gráfico revela uma grande proximidade entre essas curvas para ambos os tempos, o que é indicativo de boa aderência dos modelos em questão aos dados reais. Tal resultado é corroborado pelo teste não-paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (vide, por exemplo, (D'AGOSTINO; STEPHENS, 1986), cujos p-valores obtidos são iguais a 0,6198 (ferro fundido) e 0,8217 (concreto polimérico). Na Figura 28 (painel direito), são apresentadas também as curvas de taxa de falha estimadas para os dois tipos de tampas de bueiro.

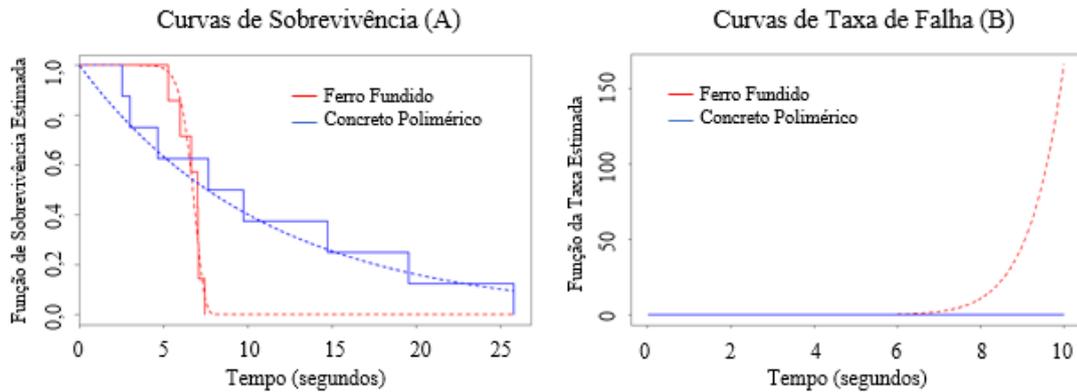


Figura 28 (A): Curvas de confiabilidade estimadas (linhas tracejadas), sobrepostas às estimativas de Kaplan-Meier (linhas contínuas). (B): Curvas de taxa de falha estimadas.

Fonte: Elaboração Própria (CIMATEC, 2018).

Convém notar que os tempos de falha observados nos experimentos realizados são expressos em segundos (s). Isto se deve ao fato de serem resultantes de ensaios de vida acelerados, em que foram aplicadas, inclusive, forças iniciais diferentes, e que aumentavam gradativamente (mais lentos ou mais acelerados), sobre os corpos de prova produzidos de cada material (ferro fundido ou concreto polimérico). Uma melhor análise, seria possível, caso as repetições dos experimentos fossem feitas sob as mesmas condições experimentais, fato não possível devido à natureza dos materiais.

Vale ressaltar também que, tanto a variável de estresse (força, em N), quanto a medida de degradação do produto (deformação, em mm), foram desconsideradas neste estudo preliminar do problema. Logo, uma abordagem mais completa é necessária utilizando modelos realistas de degradação acelerada (MEEKER et al., 1998). O objetivo desta etapa é ilustrar, mediante o uso dos exemplos das tampas de bueiro de FF e de CP, a obtenção de estimativas de confiabilidade a partir de métodos quantitativos estatísticos.

A partir dos dados acima calculados, são completadas as fórmulas para a Estimativa de Confiabilidade que são apresentadas na Tabela 28. Para fins da presente tese, serão considerados cenários distintos de tempo de interesse que serão descritos no item 4.2. Este procedimento será realizado, pois no projeto Concreto polimérico não havia o objetivo de estimar a confiabilidade.

Tabela 28 Estimativa da Confiabilidade.

Ferro fundido	$\text{Conf\_cal} = e^{-(t/6,9283)^{13,1758}}, t \geq 0$ . Conforme equação (9).
Concreto Polimérico	$\text{Conf\_cal} = e^{-0,0912 t}, t \geq 0$ . Conforme equação (10).

Fonte: Elaboração Própria (CIMATEC, 2018).

## 4.2. SIMULAÇÕES

Este capítulo exhibe as análises das simulações realizadas a partir das estimativas das variáveis apresentadas no capítulo anterior, seguido da entrada de dados no modelo para avaliar as opções: **ferro fundido (FF)** e **concreto polimérico (CP)**. A partir das características dos modelos probabilísticos das RB (PEARL, 2003), replicou-se uma situação de tomada de decisão sob incerteza (HOSSEINI; IVANOV, 2020) para auxiliar na seleção de opções em PDP. Para isso foram utilizadas duas estratégias:

- utilização de diferentes **cenários externos** (CINAR; KAYAKUTLU, 2010); e
- análise de **inferências** pela propagação direta para medir o impacto de uma ou mais variáveis no nó final (HOSSEINI; BARKER, 2016).

Para cada simulação de cenário ou inferência foi gerado um arquivo de texto com cem mil amostras cada, totalizando dez arquivos com um total de um milhão de amostras. A seleção da quantidade de amostras de cada simulação foi decorrente da utilização de simulação inicial para verificar a convergência dos dados, seguindo a Lei dos Grandes Números (HSU; ROBBINS, 1947). A Tabela 29 demonstra que à medida que são tomadas mais amostras para uma mesma simulação, os resultados convergem. Desta forma, seleciona-se o perfil de amostragem de cem mil para cada simulação, pois gera um erro absoluto baixo, conforme apresentado na Tabela 29.

Tabela 29 Simulação para definir número de amostras.

Número de amostras	Maturidade Tecnologia	Ambiental	Social	Confiabilidade	Custo	Sustentabilidade
1	0,0%	100,0%	100,0%	0,0%	100,0%	100,0%
10	50,0%	100,0%	70,0%	70,0%	80,0%	90,0%
100	28,0%	95,0%	70,0%	69,0%	87,0%	75,0%
1.000	33,9%	92,2%	72,3%	64,3%	88,1%	71,9%
10.000	35,0%	90,2%	70,5%	64,6%	89,0%	71,3%
100.000	34,8%	90,1%	70,8%	64,8%	88,5%	70,8%
1.000.000	34,9%	90,3%	70,7%	65,0%	88,4%	70,8%
Erro absoluto	0,5%	0,1%	0,1%	0,3%	0,1%	0,1%

Fonte: Elaboração Própria (2020).

Em seguida os dados foram compilados, combinados no programa de computador Power Bi Desktop (MICROSOFT, 2020), usado para desenvolver o painel de controle representado pela Figura 29.

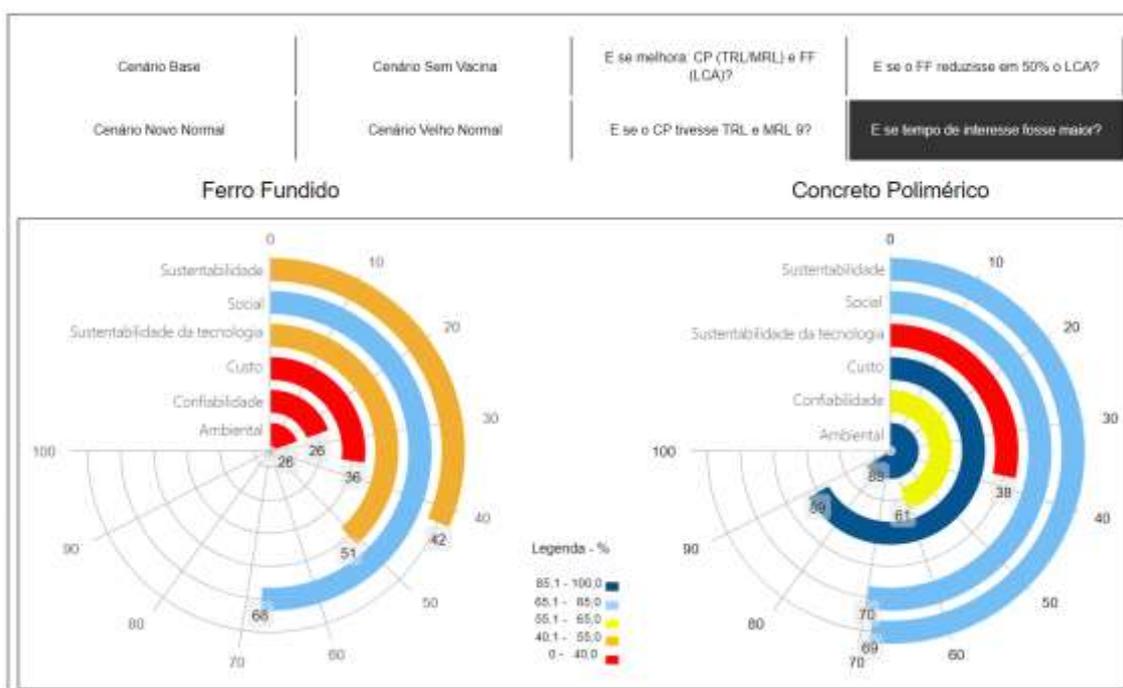


Figura 29 Painel de Controle.

Fonte: Elaboração Própria (2020)

Os cenários externos simulados foram: **base**, **novo normal**, **sem vacina** e **velho normal**, conforme descrito anteriormente. As inferências, consideradas para efeitos comparativos a partir do **cenário base**, foram:

- I. E se a opção em CP tivesse o TRL e o MRL iguais a 9?;
- II. E se a opção em FF reduzisse o impacto ambiental (LCA) em 50%?;

III. E se combinassem as hipóteses I e II?

A seguir, são apresentados cada um dos cenários e inferências, descrevendo as características dos mesmos, expondo os respectivos gráficos e tabelas, além de descrever as análises e possíveis decisões.

#### 4.2.1. Cenários e inferências

- **Velho normal**

Nesta simulação é considerada a probabilidade de 100% de ocorrência do cenário **velho normal**, cujas principais características são:

- Na variável *Pesos* é dada maior influência ao **custo** (60%), em seguida a **sustentabilidade da tecnologia** (15%), **ambiental** (10%), **confiabilidade** (10%), e, baixa importância a dimensão **social** (5%);
- Na variável de *Histograma do custo unitário – R\$* é considerado o custo calculado no projeto;
- Para a variável *Casos Covid 19 dia / MM* é mantida a tendência dos valores atuais encontrados na curva; e
- Para a variável *Pegada de Carbono – Kg CO<sub>2</sub>e* é considerado o valor encontrado na ferramenta GaBi do LCA.

A partir da análise da Figura 30, destaca-se que a opção CP possui a melhor avaliação geral da sustentabilidade numa visão integrada, quando comparada com a opção do FF. Contudo, o CP tem na Sustentabilidade da Tecnologia um ponto crítico, quando comparado com o FF, principalmente em função do baixo TRL e MRL do CP. É natural esta situação, já que o CP encontra-se em fases iniciais do projeto. Examinando as dimensões ambiental e custo, verifica-se que o CP leva muita vantagem, mas para a confiabilidade, o FF possui uma situação bem mais favorável. Por fim, na dimensão social, as duas opções obtiveram valores similares.

A partir da exploração dos dados e olhando pela perspectiva de quem está tomando a decisão da continuação do projeto, os mesmos evidenciam que,

melhorando a ST e a confiabilidade, é possível que o CP tenha uma melhor performance em todas as dimensões. Este fato é muito importante, pois pode-se optar em seguir adiante no desenvolvimento do produto, direcionando claramente qual é o foco dos esforços a seguir.

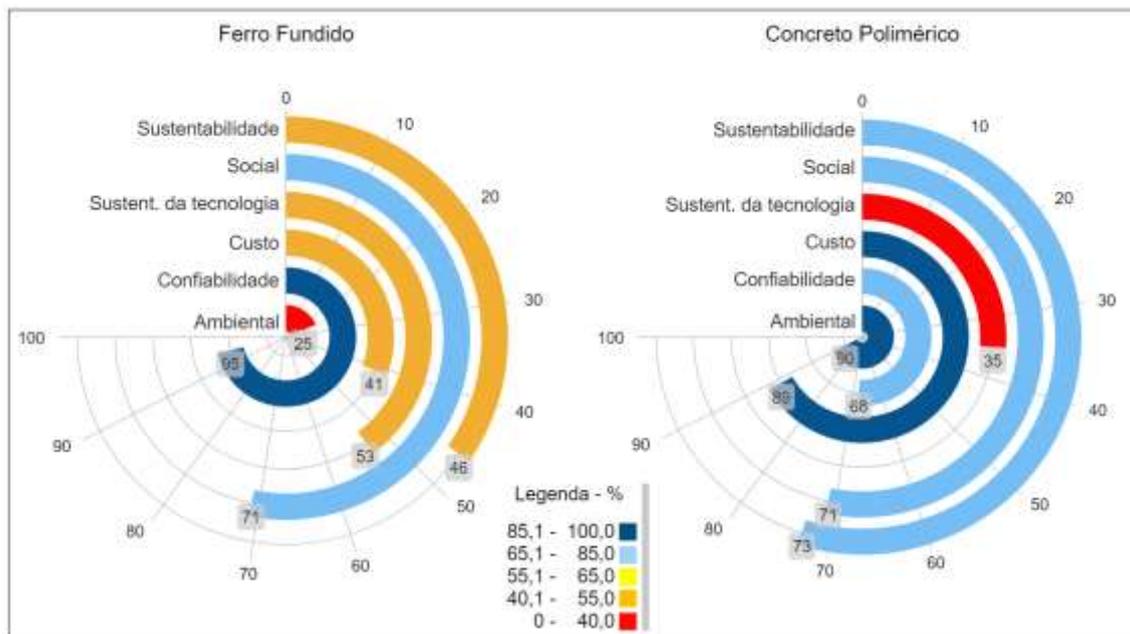


Figura 30 Resultados obtidos no cenário velho normal.

Fonte: Elaboração Própria (2020)

Uma outra abordagem que pode ser feita a partir da análise acima é levantar a hipótese do que ocorreria caso o CP tivesse o TRL e o MRL com valores iguais a 9. Esta nova simulação ou inferência é uma importante opção no uso do modelo, utilizando-se de uma racionalização de causa-efeito a partir da propagação desta mudança (HOSSEINI; BARKER, 2016). Desta forma, também será apresentada esta simulação.

- **Novo normal**

Nesta simulação, é considera a probabilidade de 100% de ocorrência do cenário **novo normal**, cujas principais características são:

- Na variável *Pesos*, passa a ser dado maior importância a dimensão **ambiental** (25%) e a **social** (25%). Em seguida, à **sustentabilidade**

**da tecnologia (20%), confiabilidade (20%).** A influência da dimensão **custo** é reduzida para 10% neste cenário;

- Na variável de *Histograma do custo unitário – R\$*, é considerado o custo calculado no projeto;
- Para a variável *Casos Covid 19 dia / MM*, é mantida a tendência dos valores atuais encontrados na curva; e
- Para a variável *Pegada de Carbono – Kg CO<sub>2e</sub>*, é considerada uma redução no valor encontrado na ferramenta GaBi do LCA, conforme as estimativas de (LE QUÉRÉ et al., 2020).

A partir da análise da Figura 31, destaca-se que a opção CP continua com melhor avaliação geral da sustentabilidade. Entretanto, com a redução do peso relativo da dimensão custo e aumento do peso da Sustentabilidade da Tecnologia, a opção FF aproxima-se no valor global da opção CP. Fica mais evidente ainda a importância da evolução da prontidão da tecnologia do CP. Ao analisar as demais variáveis no modelo, fica claro a necessidade de avançar no TRL e no MRL.

Por outro lado, poderia levantar a hipótese de redução do impacto ambiental do FF e buscar simular esta situação e quais impactos teriam tanto da dimensão ambiental, quanto na dimensão sustentabilidade. Esta inferência pode levar a uma situação de maior valor para o FF e gerar mais dúvida na continuidade do projeto do CP.

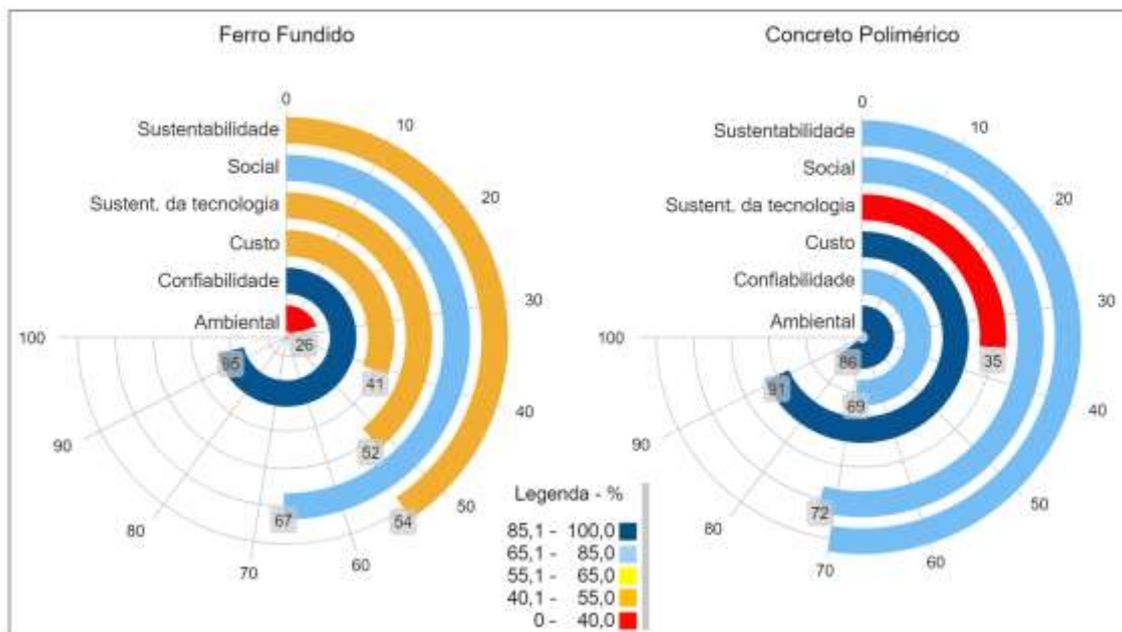


Figura 31 Resultados obtidos no cenário novo normal.

Fonte: Elaboração Própria (2020)

#### • Sem vacina

Nesta simulação é considerada a probabilidade de 100% de ocorrência do cenário **sem vacina**, cujas principais características são:

- Na variável *Pesos*, passa a ser dada maior importância a dimensão **social** (50%). Em seguida a dimensão **ambiental** (15%), **custo** (15%) e a **sustentabilidade da tecnologia** (15%) e menor para a **confiabilidade** (5%);
- Na variável de *Histograma do custo unitário – R\$*, é considerado um aumento significativo nos custos, principalmente em função de paradas de empresas e dificuldades logísticas;
- Para a variável *Casos Covid 19 dia / MM*, também é considerado ter um aumento dos casos em relação aos valores atuais; e
- Para a variável *Pegada de Carbono – Kg CO<sub>2</sub>e*, é considerado o mesmo valor encontrado na ferramenta GaBi do LCA.

Neste cenário, é dada maior importância à dimensão social e tanto o CP quanto o FF possuem valores similares, implicando na redução da lacuna entre os

valores totais da sustentabilidade. Contudo, como neste cenário há uma perspectiva do aumento dos casos de COVID-19, pode-se aumentar a probabilidade de aumento de custos nas cadeias de suprimentos (HOEK, 2020). Desta forma, as duas opções perdem a sustentabilidade na dimensão custos.

Este cenário amplifica a importância da sustentabilidade numa visão mais ampla, indicando que possam ocorrer mais investimentos sustentáveis (FINK, 2020), particularmente visando uma mais rápida transição energética (SOVACOOOL; FURSZYFER DEL RIO; GRIFFITHS, 2020). Com isso, poderia tomar a decisão de continuar investindo no desenvolvimento do projeto do CP, desde que haja avanços na Sustentabilidade da Tecnologia do mesmo, conforme verificado na Figura 32.

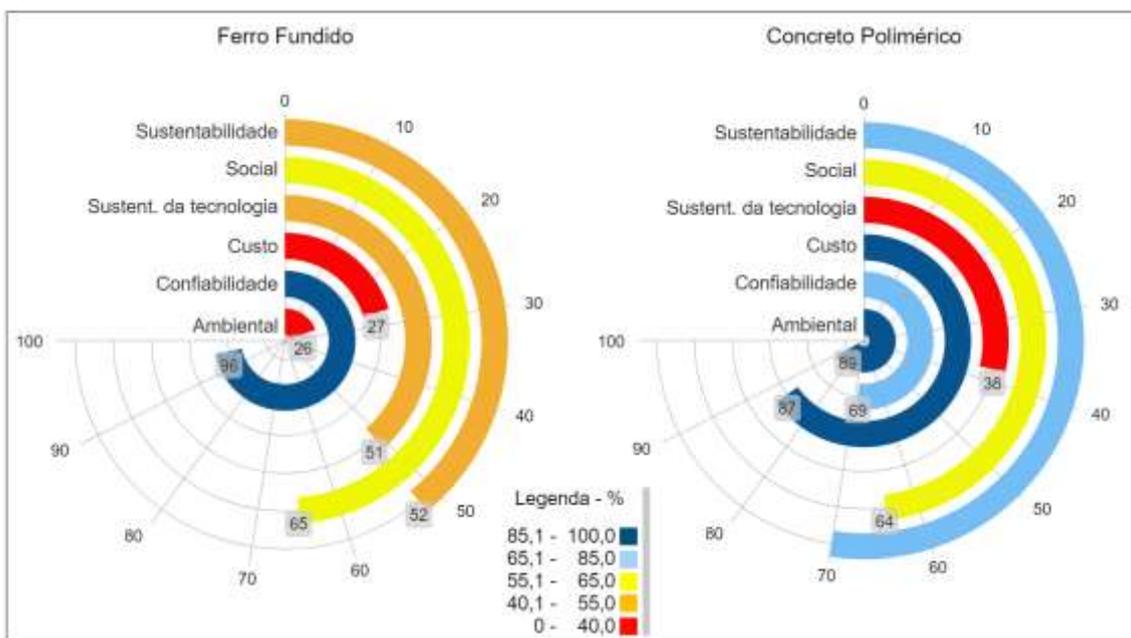


Figura 32 Resultados obtidos no cenário sem vacina.

Fonte: Elaboração Própria (2020)

Por outro lado, uma opinião oposta pode prevalecer, considerando que em um ambiente de pandemia o risco de investimento cresce, principalmente em países em desenvolvimento (LOAYZA; PENNING, 2020). Neste caso, poderia tomar a decisão de paralisar ou suspender o projeto do CP.

Estes dois pontos de vistas antagônicos são importantes e normais em situações de incerteza e que podem ser, gradativamente reduzidos à medida que outras

simulações e inferências possam ser realizadas e discutidas. Desta forma, o modelo pode indicar e suportar decisões a partir destas discussões.

- **Cenário base**

Este cenário contempla a combinação das probabilidades dos cenários anteriormente apresentados. Foi estimado que tem 20% de probabilidade para o cenário **velho normal**, 25% para o cenário **sem vacina** e 55% para o cenário **novo normal**. A intenção é verificar o comportamento das duas opções numa possível combinação de cenários, já que a incerteza é presente nestes contextos. E esta combinação pode trazer maior elucidação nestes momentos de decisão sob incerteza.

A partir da geração dos dados e pela análise da Figura 33, observa-se a excelente performance do CP nas variáveis de custo e ambiental quando comparado com o FF. Este cenário tem o papel de ser a referência para as inferências que serão realizadas nas simulações a seguir.

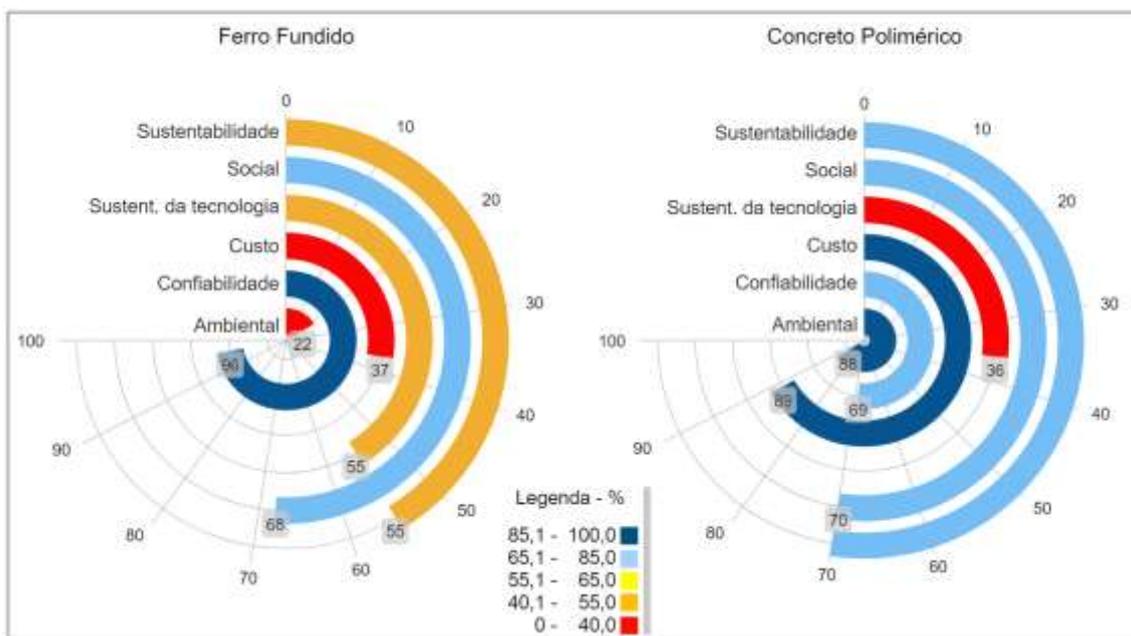


Figura 33 Resultados obtidos no cenário base.

Fonte: Elaboração própria (2020)

- **E se a opção em CP tivesse o TRL e o MRL iguais a 9?**

Conforme analisado no cenário **velho normal**, a Sustentabilidade da Tecnologia é a dimensão crítica do CP. A partir da análise do modelo, observa-se que as variáveis TRL e MRL têm uma influência muito grande neste peso, em seguida, aparece a variável *barreiras à entrada* com 51% de probabilidade de ser **sim**. A partir desta constatação, propõe-se investigar a propagação da mudança dos valores do TRL e do MRL para 9.

Após as alterações e comparando com o cenário base, observa-se que a dimensão ST aumenta a probabilidade de ser sim de 36% para 57%. Quando comparado com o FF, verifica-se que o CP ultrapassa o FF que tem 55%. Na avaliação geral da sustentabilidade, o CP sobe de 70% e alcança 71%. Valor este bem acima do apresentado pelo FF com 55%. A partir da análise da Figura 34, verifica-se a consolidação da vantagem do CP frente o FF.

Desta forma, poderia optar pela decisão de continuar investindo no projeto CP, desde que seja estabelecida uma estratégia para suplantar as *barreiras à entrada* existentes. Com esta flexibilidade, o modelo apresenta a sua perspectiva de análise integrada, utilizando as diferentes dimensões da sustentabilidade para dar apoio a tomada de decisão.

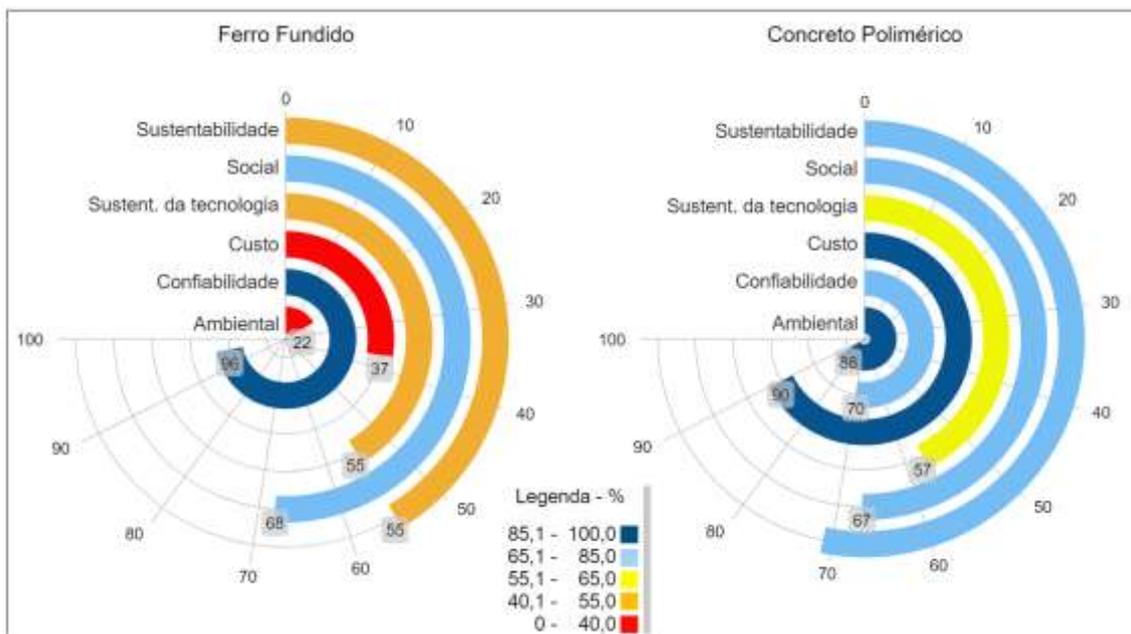


Figura 34 Resultados obtidos na hipótese do CP ter TRL e MRL iguais a 9.

Fonte: Elaboração Própria (2020)

- E se a opção em FF reduzisse o impacto ambiental (LCA) em 50%?

O principal foco desta inferência é verificar o efeito que teria nas dimensões da sustentabilidade caso o FF pudesse reduzir em 50% o seu impacto ambiental no ciclo de vida. Esta hipótese é importante, pois poderia reposicionar o mesmo como produto sustentável, dificultando ainda mais a entrada do CP no mercado.

Esta é uma importante flexibilidade do modelo, pois ele pode ser utilizado sob a perspectiva do concorrente. A partir daí, ações e estratégias podem ser revistas para o produto proposto ao ser comparado a um concorrente reposicionado. Em outras situações, este tipo de simulação também pode ter a função de avaliar o impacto ambiental e traçar estratégias de transição visando a sustentabilidade de produtos existentes .

A análise dos resultados, a partir da Figura 35, indica que as duas opções passariam a ter valores similares na dimensão ambiental com pequena vantagem para o CP. Já na avaliação geral da sustentabilidade, o CP permanece à frente. É importante salientar que a hipótese de redução do impacto ambiental deve ser suportada por opinião de especialista para estimar estas possíveis reduções. No caso particular do ferro fundido, estas reduções poderiam ser decorrentes de novos processos de fabricação que poderiam contemplar o uso de biomassa (NORGATE et al., 2012). Observa-se, porém, que os valores de redução de 50% são fictícios com o objetivo de ilustrar possíveis cenários.

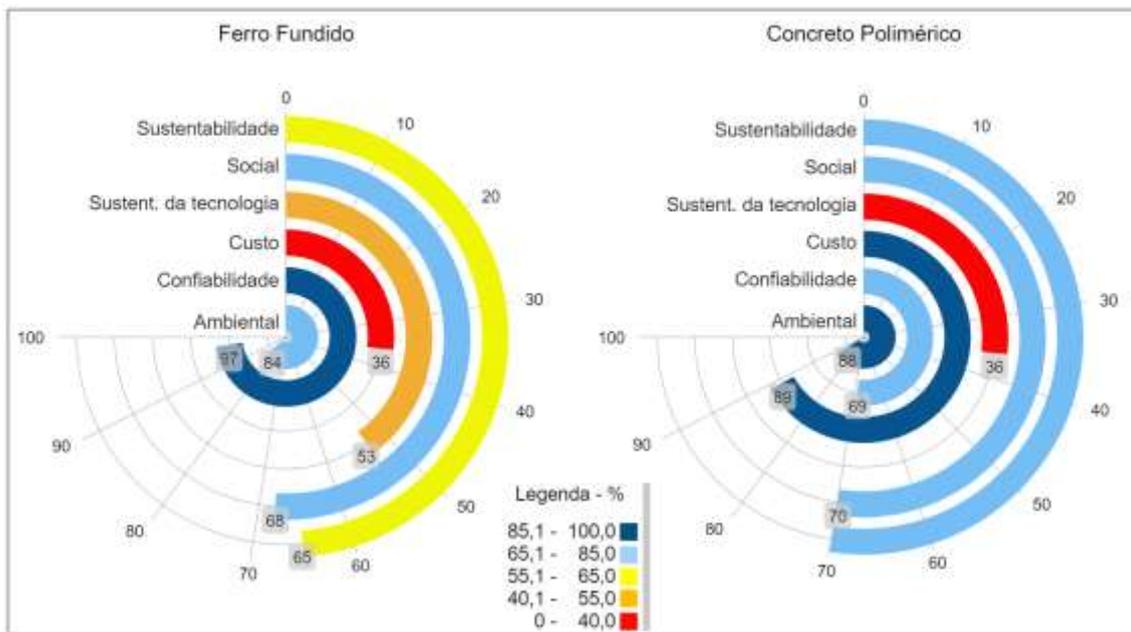


Figura 35 Resultados obtidos na hipótese de redução do impacto ambiental do FF em 50%.

Fonte: Elaboração Própria (2020)

- **E se combinasse a opção na qual o CP tivesse o TRL e o MRL iguais a 9 com a opção do FF com redução do impacto ambiental em 50%?**

Esta combinação de possibilidades contempla as duas simulações anteriores. A Figura 36 apresenta os resultados desta combinação. Nesta hipótese, o CP continua tendo melhora do ponto de vista da visão integrada da sustentabilidade com valor de probabilidade de 70%, enquanto que o FF obtém 65%. Do ponto de vista da ST, o CP também passa o FF, com respectivamente 57% e 53%. Por outro lado, na dimensão ambiental, o FF (84%) aproxima-se do CP (88%).

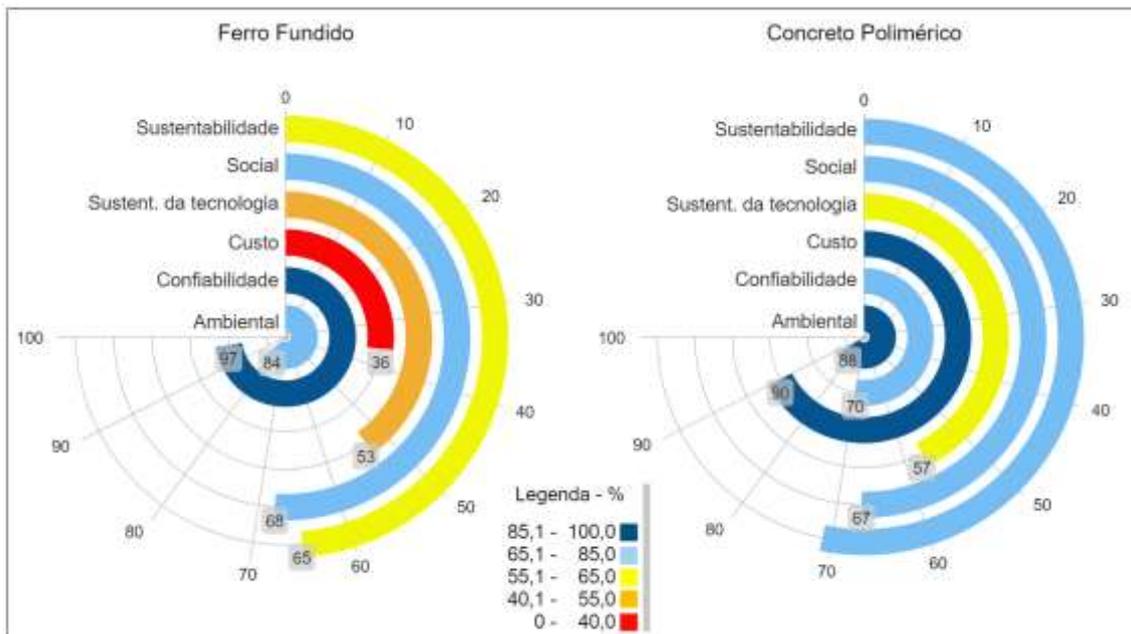


Figura 36 Resultados obtidos na hipótese do CP com TRL e MRL 9 comparado com o FF com redução de 50% no LCA.

Fonte: Elaboração Própria (2020)

Contudo, deve-se salientar que o produto em FF já está consolidado no mercado. Desta forma, outras variáveis presentes no modelo podem ser selecionadas para continuidade da análise. Esta versatilidade contribui para a avaliação da continuidade do projeto com o objetivo final de lançar o produto em CP. Por exemplo, poderiam ser utilizadas as variáveis *Acesso à Mão de Obra*, *Acesso a Financiamento* e a *Saturação do mercado*. A Tabela 30 mostra os resultados destas variáveis obtidos nas simulações para as duas opções.

Observa-se que em todas as variáveis o CP possui melhor resultado do que o FF. Este fato pode indicar que, com um plano de negócios robusto e altos valores de TRL e MRL, o referido produto pode ter maior probabilidade de ser sustentável em todas as dimensões do modelo proposto.

É importante salientar que os números apresentados na Tabela 30 são oriundos da pesquisa realizada com os especialistas participantes do projeto em conjunto com um representante da empresa parceira (CIMATEC, 2018). Esta informação é relevante, pois é na combinação de variáveis quantitativas baseadas em distribuições probabilísticas e variáveis qualitativas oriundas da opinião de especialistas que o modelo proposto busca refletir e melhor representar os processos de tomada de decisão em fases iniciais de PDP.

Tabela 30 Comparação entre o FF e o CP.

	Ferro Fundido	Concreto Polimérico
Acesso à Mão de Obra	83%	93%
Acesso a financiamento	84%	93%
Saturação do mercado	52%	49%

Fonte: Elaboração Própria (2020)

#### 4.2.2. Quadro resumo das simulações

A Tabela 31 resume os dados da variável *Sustentabilidade* do modelo aplicados para todos os cenários e inferências tanto para a opção FF, quanto para a opção CP. Desta forma, consegue-se observar que em todos eles, o CP tem maior probabilidade de ser sustentável. Este quadro sintetiza e pode dar o suporte necessário, aliado aos quadros anteriores e às simulações realizadas, pela continuidade do projeto concreto polimérico.

Contudo, é patente que esta decisão deve vir acompanhada de um plano estratégico e de negócios para que as variáveis que tenham tido valores baixos possam ser mitigadas.

Tabela 31 Probabilidade de ser sustentável.

Simulação	Ferro Fundido	Concreto Polimérico
Cenário Velho Normal	46%	73%
Cenário Novo Normal	54%	70%
Cenário Sem Vacina	52%	70%
Cenário Base	55%	70%
E se o CP tivesse TRL e MRL iguais a 9?	56%	71%
E se a opção FF reduzisse o impacto ambiental (LCA) em 50%?	65%	70%
E se combinasse as duas últimas opções?	65%	71%

Fonte: Elaboração Própria (2020)

## 5. CONCLUSÃO

Este capítulo traz as considerações finais dos principais pontos discutidos neste trabalho. Em seguida, aborda a questão de pesquisa e como foram alcançados os objetivos específicos. Por fim, apresenta a conclusão relacionada aos resultados obtidos, as limitações do trabalho e as propostas de desenvolvimentos futuros.

Neste estudo, foi detalhada a importância da sustentabilidade e a necessidade de desenvolvimento de modelos que contribuam para uma transição mais rápida. Principalmente em um ambiente de pandemia, o tema sustentabilidade demanda proposições mais assertivas (KUZEMKO et al., 2020) e uma destas ações poderiam estar associadas ao projeto de produtos sustentáveis que contribuam para conter a degradação de ecossistemas (FULLER; OTTMAN, 2004).

A revisão de literatura dos temas relativos à tese permitiu identificar que os atuais modelos da LCE possuem lacunas que podem ser suplantadas com a inclusão de uma visão mais holística, incorporando a dimensão da tecnologia (PEÇAS et al., 2016), representada pela sustentabilidade da tecnologia (ST) e a confiabilidade às dimensões ambiental, de custo e social existentes nos modelos atuais. Outros autores salientam que as fases iniciais de desenvolvimento de produto e tecnologia são caracterizadas pelo alto grau de incerteza em seus modelos (MUNTHE et al., 2014) e necessitam de análise integrada das dimensões (HALOG; MANIK, 2011).

Observou-se, também, a necessidade de desenvolvimento de indicadores mais robustos para a dimensão social (FINKBEINER et al., 2010) e uma visão mais ampla da tecnologia, englobando: técnica, mercado e escalonamento (TRAPPEY et al., 2011), além de identificar matematicamente as fases de maturidade na curva S (KUCCHARAVY; DE GUIO, 2011).

Dentro deste contexto, foi elaborada a pergunta de pesquisa: “qual seria a modelagem computacional para incorporar as dimensões da tecnologia e da confiabilidade ao modelo atual da LCE, no contexto de tomada de decisão no desenvolvimento de produto e tecnologia, considerando as suas características de incerteza e sistêmica?”

Para respondê-la, o modelo computacional foi desenvolvido com o uso das **redes bayesianas híbridas**, que se baseia na **teoria probabilística** e integrou as dimensões da **sustentabilidade da tecnologia** e **confiabilidade** ao modelo atual da LCE. A incorporação destas novas dimensões às dimensões ambiental, social e de custo existentes, acrescentou uma mais **visão sistêmica** ao modelo. Já a teoria probabilística viabilizou adicionar a característica de **incerteza** no mesmo.

O uso das RB híbridas possibilitou, ainda, englobar variáveis quantitativas e qualitativas, através da opinião de especialistas, dentro do contexto de **tomada de decisão no desenvolvimento de produto e tecnologia**. Adicionalmente, o modelo tem a flexibilidade de alterar os pesos entre as variáveis e utilizar diferentes cenários externos, reforçando as características de incerteza e visão sistêmica.

Para responder à questão de pesquisa, foram estabelecidos objetivos específicos intermediários que também foram atingidos. O primeiro foi desenvolver o modelo para avaliar a tecnologia, através do conceito Sustentabilidade da Tecnologia que foi atendido com a construção de um arranjo que englobou a perspectiva de mercado e sua competitividade com o uso do *framework* das 5 Forças de Porter (PORTER, 1996) e curva S, aliados com à perspectiva da empresa através do escalonamento da tecnologia, representadas pela maturidade técnica (TRL e MRL) e pela capacidade de estruturação.

O segundo objetivo específico foi de selecionar modelos de quantificação de confiabilidade em fases iniciais de desenvolvimento de produto e tecnologia. Para tanto, foi realizada revisão de literatura referente a este ponto específico e, através da mesma, foram levantadas diversas ferramentas e modelos probabilísticos que poderão ser utilizados no modelo, de acordo com o a fase e com o tipo de informação disponível, seja ela qualitativa ou quantitativa. Particularmente nesta tese, foram utilizados dados de testes existentes que possibilitaram definir as funções de confiabilidade das opções estudadas.

O atendimento do terceiro objetivo de selecionar a ferramenta para desenvolvimento do modelo e do quarto objetivo de desenvolver modelo computacional de suporte à tomada de decisão, integrandos as dimensões,

foram contemplados com a utilização do conceito das RB aplicados através do software GeNie (BAYESFUSION, 2020). Por fim, o quinto objetivo específico foi comprovado através da aplicação do modelo desenvolvido no projeto concreto polimérico (CIMATEC, 2018).

Desta forma, o modelo possibilitou suplantando lacunas importantes destacadas pela literatura com o alcance de uma visão mais holística ao incorporar a dimensão da tecnologia (PEÇAS et al., 2016) e a confiabilidade às dimensões ambiental, de custo e social existentes nos modelos atuais da LCE. A dimensão proposta sustentabilidade da tecnologia (ST) passou a englobar a perspectiva técnica, de mercado e do escalonamento (TRAPPEY et al., 2011), além de identificar matematicamente as fases de maturidade na curva S (KUCHARAVY; DE GUIO, 2011). A incorporação da dimensão da confiabilidade e suas metodologias visaram inserir a perspectiva da consequência da falha na sustentabilidade e a visão do cliente no modelo integrado.

Outras características relevantes do modelo estão vinculadas com à incorporação da incerteza com a utilização da teoria probabilística e de uma análise integrada das dimensões através de indicadores da sustentabilidade. Adicionalmente, reuniu indicadores mais robustos para a dimensão social com o uso da taxa de acidentes com afastamento e taxa de casos COVID-19.

A aplicação do modelo em projeto real demonstra a sua capacidade de utilização prática tanto no contexto empresarial, quanto acadêmico. A realização de simulações, a incorporação de cenários externos, o uso de diferentes pesos para cada dimensão e a realização de inferências no modelo, ressalta o seu papel de apoio no processo decisório. A criação de painel de controle no programa de computador Power Bi Desktop (MICROSOFT, 2020) agregou uma nova perspectiva na análise dos resultados de todas as simulações e inferências realizadas, possibilitando visualizar os dados de cada dimensão individualmente, como também os resultados integrados.

Portanto, o modelo se estabelece como uma ferramenta analítica de apoio à tomada de decisão, suportada pela base teórica das RB que possibilita lidar bem com a incerteza; com a integração e interdependência de variáveis; com a combinação de dados quantitativo e qualitativos; além de possibilitar modelar

cenários e inferências. Tudo isso podendo ser suportado pela análise e opinião de especialistas em um contexto de desenvolvimento de produto e tecnologia.

Salienta-se, também, que o modelo permite ser aplicado em diversas circunstâncias, como: desenvolvimentos de estratégias para produtos mais sustentáveis, seleção de opção mais sustentável e avaliação de produtos concorrentes. O modelo também pode ser adaptado, em função da facilidade do software GeNie, permitindo incluir ou modificar variáveis de acordo com o contexto dos estudos.

Contudo, algumas limitações do presente estudo merecem ser discutidas. Algumas TPN tiveram que ser estimadas, pois não haviam informações preliminares. Este item pode ser incorporado à pesquisa qualitativa como etapa para elaboração do modelo. Outra limitação está relacionada a aplicação do modelo, pois o mesmo só foi utilizado em um único projeto. Em relação aos dados de mensuração da confiabilidade, observa-se a necessidade de realização de mais testes experimentais para utilização de modelos de degradação acelerada para melhor estimar a confiabilidade (MEEKER et al., 1998).

Em relação ao software utilizado e seus respectivos algoritmos é sugerido que sejam realizadas simulações com os outros algoritmos existentes no GeNie. A partir daí, será possível realizar uma análise comparativa entre os mesmos. Do ponto de vista das variáveis contínuas é conveniente a realização de simulação com diferentes funções de distribuição de probabilidade com o intuito de uma avaliação crítica do modelo matemático e sua adequação às variáveis estudadas.

Particularmente ao modelo proposto, também podem ser realizadas simulações sem contemplar as novas dimensões proposta no mesmo. Desta forma, podem ser evidenciados os benefícios e as diferenças da incorporação das novas dimensões. Especificamente em relação às RB, destaca-se que a complexidade computacional é uma das limitações mais fortes das mesmas. Desta forma é indicado que não sejam acrescentados diversos nós ou variáveis sem que não haja uma avaliação preliminar da performance. Para as simulações realizadas

na presente tese, este aspecto não se mostrou relevante, pois cada simulação com amostragem de 100.000 não ultrapassou mais do que 3 segundos.

Ainda em relação ao modelo e sua topologia, sugere-se que possam ser realizados estudos de novas topologias e inclusão de novas variáveis da dimensão social. A partir daí, avaliar os resultados das diferentes versões, combinado com o processo de identificação de independência entre as variáveis, com a utilização de critérios como d-separação (GEIGER; VERMA; PEARL, 1990).

Em relação à pesquisa realizada com os especialistas para avaliação das variáveis qualitativas da maturidade da tecnologia, observou-se uma grande dispersão dos resultados em variáveis como TRL e MRL. Desta forma, verifica-se se a necessidade de incorporar critérios que definam o perfil e a experiência dos especialistas que avaliarão estas variáveis para garantir melhor consistência das avaliações. Especificamente para o TRL e para o MRL, sugere-se que feito um questionário específico para a avaliação dos mesmos. Outro aspecto em relação à pesquisa está relacionado com o risco de levar a viés decisório da mesma, assim, uma revisão das perguntas realizadas com os especialistas pode ser indicado.

Além dos aspectos acima mencionados, outros desenvolvimentos podem ser realizados para serem incorporados à modelagem computacional realizada, como: a utilização de redes bayesianas dinâmicas com a incorporação do uso de dados temporais ao longo do desenvolvimento do produto (AYELE; BARABADY; DROGUETT, 2016). Com esta evolução, o modelo poderia contemplar avaliar como o projeto evolui do ponto de vista de sustentabilidade ao longo do seu desenvolvimento.

Outra possibilidade é incorporar a utilização da inteligência artificial no modelo (ZHU; DESHMUKH, 2003), agregando nova funcionalidade e suporte ao processo decisório. Por fim, poderá ser inserido no modelo o conceito de resiliência que pode ser mensurado pela capacidade de absorver, se adaptar e se restaurar (AVEN, 2011; HAIMES, 2009; HOSSEINI; BARKER; RAMIREZ-MARQUEZ, 2016) e a criação de um software que possibilite que a modelagem

seja realizada de forma mais rápida, evitando a utilização de diversas plataformas.

Desta forma, em relação ao modelo, as seguintes melhorias de curto prazo podem ser priorizadas: revisar a pesquisa qualitativa com especialistas para minimizar o risco de viés decisório, incorporando a revisão das tabelas probabilísticas de nós; desenvolver critério que estabeleça o perfil e experiência dos especialistas que irão participar na mesma pesquisa; e realizar novas aplicações do modelo em outros projetos. A partir da experiência adicional adquirida com as melhorias acima descritas, poderia ser criada a primeira versão do software executável do modelo, que também já incorporaria o conceito das redes bayesianas dinâmicas. Esta versão inicial pode incluir outras formas de visualização dos resultados por meio de painéis de controle que visualizem as características probabilísticas das diferentes dimensões da sustentabilidade.

Na perspectiva acadêmica, uma nova linha de pesquisa relativa ao processo de tomadas de decisão sobre incerteza pode ser incorporada ao Centro Universitário do SENAI CIMATEC, além de serem criadas disciplinas sobre redes bayesianas, de confiabilidade e de sustentabilidade. Na perspectiva empresarial e de aumento de competitividade industrial, o modelo pode ser agregado ao portfólio do Centro Tecnológico do SENAI CIMATEC como solução aplicada tanto em Serviços Tecnológicos, quanto em projetos de PD&I.

Assim, o estudo pode continuar a avançar de forma consistente tanto para seu principal objetivo de ser uma ferramenta de apoio à tomada de decisão visando produtos sustentáveis, como também, contribuindo tanto do contexto empresarial, quanto acadêmico do SENAI CIMATEC.

## 6. REFERÊNCIAS

AARSET, M. V. How to Identify a Bathtub Hazard Rate. **IEEE Transactions on Reliability**, v. R-36, n. 1, p. 106–108, 1987.

ABNT. NBR ISO16290. **Sistemas espaciais — Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação**, p. 21, 2015.

ADAMUTHE, A. C.; THAMPI, G. T. Technology forecasting: A case study of computational technologies. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 143, p. 181–189, 1 jun. 2019.

AFRINALDI, F.; ZHANG, H. C. A fuzzy logic based aggregation method for life cycle impact assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 67, n. March, p. 159–172, 2014.

AKAIKE, H. A New Look at the Statistical Model Identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 19, n. 6, p. 716–723, 1974.

ALBERS, A.; MEBOLDT, M. IPEMM - Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. **International Conference on Engineering Design, ICED'07**, n. August, p. 1–9, 2007.

ALMALKI, S. J.; NADARAJAH, S. **Modifications of the Weibull distribution: A review** *Reliability Engineering and System Safety* Elsevier Ltd, , 2014.

ALVES, J. R. X.; ALVES, J. M. Selection of best location for industrial installation using analytic hierarchy process (AHP). **Producao**, v. 25, n. 1, p. 13–26, 2015.

ANDRADE, H. et al. **Avaliação da maturidade tecnológica: Conceitos**. 1ª Edição ed. Jundiaí: [s.n.].

ANDRADE, H. DE S.; JUNIOR, M. DE F. C.; SILVA, M. B. **AVALIAÇÃO DA MATURIDADE TECNOLÓGICA : CONCEITOS**. [s.l: s.n.].

ARDILIO, A.; WARSCHAT, J.; SPATH, D. **Customized technology readiness: Introducing the application specific technology readiness model**. 2012 Proceedings of Portland International Center for Management of Engineering and Technology: Technology Management for Emerging Technologies, PICMET'12. **Anais...2012** Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6304148>>. Acesso em: 13 set. 2020

AVEN, T. On Some Recent Definitions and Analysis Frameworks for Risk, Vulnerability, and Resilience. **Risk Analysis**, v. 31, n. 4, p. 515–522, 1 abr. 2011.

AYALA, N. F.; FRANK, A. G. Métodos de análise multicritério : uma revisão das forças e fraquezas. p. 1–11, 2013.

AYELE, Y. Z.; BARABADY, J.; DROGUETT, E. L. Dynamic Bayesian network-based risk assessment for arctic offshore drilling waste handling practices. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 138, n. 5, 2016.

AZARKHAIL, M.; MODARRES, M. The evolution and history of reliability engineering: Rise of mechanistic reliability modeling. **International Journal of Performability Engineering**, v. 8, n. 1, p. 35–47, 2012.

AZIZIAN, N.; SARKANI, S.; MAZZUCHI, T. A Comprehensive Review and Analysis of Maturity Assessment Approaches for Improved Decision Support to Achieve Efficient Defense Acquisition. **Lecture Notes in Engineering and Computer Science**, v. 2179, n. 1, p. 1150–1157, 2009.

BALAKRISHNAN, N. et al. **Advances in Degradation Modeling: Applications to Reliability, Survival Analysis, and Finance (Statistics for Industry and Technology)**. Hamilton, Ontario - Canada: Birkhauser, 2010.

BANA, C. A.; CHAGAS, M. P. A career choice problem An example of how to use MACBETH to build a quantitative value model based on qualitative.pdf. **Working Paper LSEOR**, n. 0, p. 1–16, 2002.

BARBIER, E. B.; BURGESS, J. C. **Sustainability and development after COVID-19**World DevelopmentElsevier Ltd, , 1 nov. 2020.

BARD, J. F. A comparison of the analytic hierarchy process with multiattribute utility theory: A case study. **IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)**, v. 24, n. 5, p. 111–121, 1992.

BARE, J. C. et al. TRACI: The tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts. **Journal of Industrial Ecology**, v. 6, n. 3–4, p. 49–78, 1 jul. 2003.

BARRETO, A. **Extração de Conhecimento em Bases de Dados por Redes Bayesianas**.

BASBERG, B. L. Patents and the measurement of technological change: A survey of the literature. **Research Policy**, v. 16, n. 2–4, p. 131–141, 1 ago. 1987.

BAYESFUSION. **GeNle Academic Version**Pittsburgh - PA - USABayesFusion, LLC, , 2020. Disponível em: <<https://www.bayesfusion.com/genie/>>. Acesso em: 3 out. 2020

BERGERSON, J. A. et al. Life cycle assessment of emerging technologies: Evaluation techniques at different stages of market and technical maturity. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 1, p. 11–25, 2020.

BETZ, M.; SCHUCKERT, M.; HERRMANN, C. **Life cycle engineering as decision making support in the electronics industry**. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. ISEE - 1998 (Cat. No.98CH36145). **Anais...: IEEE International Symposium on Electronics and the Environment-ISEE**.345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE, 1998

BIROLINI, A.; DHILLON, B. S.; BIROLINI, A. **Reliability Engineering**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.

BORELLI, E. **SUSTENTABILIDADE E RISCOS AMBIENTAIS NA INDÚSTRIA QUÍMICA**Japanese Society of Biofeedback Research, 1992.

BORGES, L. Modelo Multicritério para Alocação de Recursos no Setor Elétrico

com base no PROMETHEE V. 2019.

BOZDOGAN, H. Model selection and Akaike's Information Criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. **Psychometrika**, v. 52, n. 3, p. 345–370, set. 1987.

BP. **Deepwater Horizon Accident Investigation Report** Internal BP Report. London, UK: [s.n.].

BP. **Energy Outlook 2020 edition explores the forces shaping the global energy transition out to 2050 and the surrounding that**. London, UK: [s.n.].

BRANS, J. P.; VINCKE, P.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: The Promethee method. **European Journal of Operational Research**, v. 24, n. 2, p. 228–238, 1986.

BRILHUIS-MEIJER, E.; PIGOSSO, D. C. A.; MCALOONE, T. C. Integrating Product and Technology Development: A Proposed Reference Model for Dual Innovation. **Procedia CIRP**, v. 50, p. 32–37, 2016.

BUCHERT, T. et al. Multi-criteria decision making as a tool for sustainable product development - Benefits and obstacles. **Procedia CIRP**, v. 26, p. 70–75, 2015.

CAGLAR, M. U.; TEUFEL, A. I.; WILKE, C. O. Sicegar: R package for sigmoidal and double-sigmoidal curve fitting. **PeerJ**, v. 2018, n. 1, 2018.

CASCINI, G. et al. FORMAT - Building an original methodology for Technology Forecasting through researchers exchanges between industry and academia. **Procedia Engineering**, v. 131, p. 1084–1093, 2015.

CATLETT, J. **On changing continuous attributes into ordered discrete attribute**. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics).

**Anais...** Springer Verlag, 1991 Disponível em:

<<https://link.springer.com/chapter/10.1007/BFb0017012>>. Acesso em: 3 out. 2020

CERDAS, F.; THIEDE, S.; HERRMANN, C. Integrated Computational Life Cycle Engineering — Application to the case of electric vehicles. **CIRP Annals**, v. 67, n. 1, p. 25–28, 1 jan. 2018.

CHANG, S. H.; FAN, C. Y. Identification of the technology life cycle of telematics a patent-based analytical perspective. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 105, p. 1–10, 2016.

CHEN, Y. H.; CHEN, C. Y.; LEE, S. C. Technology forecasting and patent strategy of hydrogen energy and fuel cell technologies. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 12, p. 6957–6969, 2011.

CHENG, Y. **Reliability prediction in early design stages**. [s.l.] Missouri University of Science and Technology, 2017.

CHESTNUTWOOD, M.; LEVIN, R. **Technology assessment and management methodology - an approach to system life sustainment and supportability enhancement**. AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings. **Anais...IEEE**, 1999

- CHO, Y.; DAIM, T. OLED TV technology forecasting using technology mining and the Fisher-Pry diffusion model. **Foresight**, v. 18, n. 2, p. 117–137, 11 abr. 2016.
- CHO, Y. Y.; JEONG, G. H.; KIM, S. H. A Delphi technology forecasting approach using a semi-Markov concept. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 40, n. 3, p. 273–287, 1991.
- CHOU, J. R. An ARIZ-based life cycle engineering model for eco-design. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 210–223, mar. 2014.
- CIMATEC, S. **Databook do projeto concreto polimérico**. Salvador: [s.n.].
- CINAR, D.; KAYAKUTLU, G. Scenario analysis using Bayesian networks: A case study in energy sector. **Knowledge-Based Systems**, v. 23, n. 3, p. 267–276, 1 abr. 2010.
- COFRE-MARTEL, S.; LOPEZ DROGUETT, E.; MODARRES, M. UNCOVERING THE UNDERLYING PHYSICS OF DEGRADING SYSTEM BEHAVIOR THROUGH A DEEP NEURAL NETWORK FRAMEWORK: THE CASE OF RUL PROGNOSIS. 2020.
- CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. DA. **Roteiro para revisão bibliográfica sistemática : aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos**. 8º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolviemnto de Produto - CNGDP 2011. **Anais...2011** Disponível em: <<http://vision.ime.usp.br/~acmt/conforto.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2018
- CONSERVATION, P. **Growth II - a major upgrade to our “Simply Growth” software. Fits and plots von Bertalanffy, Gompertz, Logistic and a wide range of other growth curves to length and/or weight at age data**. Hampshire - UK: [s.n.].
- COOLEN, F. P. A. Parametric Probability Distributions. **Wiley StatsRef: Statistics Reference Online**, v. 100, p. 71–131, 2014.
- COOPER, R. G. Third-Generation New Product Processes. **Journal of Product Innovation Management**, v. 11, n. 1, p. 3–14, jan. 1994.
- COVELLO, V. T. et al. (EDS.). **Uncertainty in Risk Assessment, Risk Management, and Decision Making**. Boston, MA: Springer US, 1987.
- D'AGOSTINO, R. B.; STEPHENS, M. A. **Goodness-Of-Fit Techniques**. New York: Marcel A., 1986.
- DA COSTA, G. A. T. F.; GUERRA, F. **Cálculo I**. 2ª Edição ed. Florianópolis: UFSC, 2009.
- DAIM, T. et al. Clean energy investment scenarios using the Bayesian network. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 33, n. 2, p. 400–415, mar. 2014.
- DAIM, T. U. et al. Forecasting emerging technologies: Use of bibliometrics and patent analysis. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 73, n. 8, p. 981–1012, 2006.
- DARMANI, A.; JULLIEN, C. **Innovation Readiness Level Report - Energy**

**Storage TechnologiesInnoEnergy.** [s.l: s.n.].

DAVIS-PECCOUD, J. et al. **Sustainability Is the Next Digital.** Singapore: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.bain.com/insights/sustainability-is-the-next-digital/>>. Acesso em: 21 set. 2020.

DAWID, A. P. Applications of a general propagation algorithm for probabilistic expert systems. **Statistics and Computing**, v. 2, n. 1, p. 25–36, 1992.

DE GOOIJER, J. G.; HYNDMAN, R. J. **25 Years of Time Series ForecastingInternational Journal of Forecasting.** [s.l: s.n.].

DERWENT-INNOVATION. **Patent research and analytics.** Disponível em: <<https://www.derwentinnovation.com/>>. Acesso em: 9 nov. 2019.

DERWENT INNOVATION INDEX - DII. **Derwent Innovation Index.** Disponível em: <<https://www.derwentinnovation.com/login/>>. Acesso em: 16 ago. 2020.

DHILLON, B. S. (BALBIR S. . **Life cycle costing for engineers.** [s.l.] Taylor & Francis, 2010.

DIEESE. **Anuários dos TrabalhadoresMinistério do Trabalho.** [s.l: s.n.].

DNV-GL. **Recommended Practice DNV-RP-203 “Technology Qualification”.** [s.l: s.n.].

DOSI, G. Technological paradigms and technological trajectories. A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. **Research Policy**, v. 11, n. 3, p. 147–162, 1982.

DROGUETT, E. L.; MOSLEH, A. ANÁLISE BAYESIANA DA CONFIABILIDADE DE PRODUTOS EM DESENVOLVIMENTO. **Gestão & Produção**, v. 13, n. jan-abri 2006, p. 57–69, 2006.

DROGUETT, E. L.; MOSLEH, A. **Bayesian methodology for model uncertainty using model performance dataRisk Analysis** John Wiley & Sons, Ltd (10.1111), , 1 out. 2008. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1539-6924.2008.01117.x>>. Acesso em: 16 abr. 2019

DRUZDZEL, M. J. SMILE: structural modeling, inference, and learning engine and genie: a development environment for graphical decision-theoretic models. **Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence**, p. 900–901, 1999.

DUFLOU, J. R. et al. Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, n. 1, p. 9–12, 2009.

DUVERLIE, P.; CASTELAIN, J. M. Cost estimation during design step: Parametric method versus case based reasoning method. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 15, n. 12, p. 895–906, 1999.

ECDC. **COVID-19 Pandemic.** Disponível em: <<https://www.ecdc.europa.eu/en/covid-19-pandemic>>. Acesso em: 1 out. 2020.

- ECONOMIST, T. **Business and climate change - The great disrupter**. Disponível em: <<https://www.economist.com/special-report/2020/09/17/the-great-disrupter>>. Acesso em: 21 set. 2020.
- EGILMEZ, G. et al. A fuzzy data envelopment analysis framework for dealing with uncertainty impacts of input-output life cycle assessment models on eco-efficiency assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 622–636, 2016.
- EKENER PETERSEN, E.; EKENER-PETERSEN, E. **Tracking down social impacts of products with social life cycle assessment**. [s.l.: s.n.].
- ELKINGTON, J. **Cannibals with forks**. [s.l.] Capstone, 1997.
- ENGEL, D. et al. **Development of Technology Readiness Level (TRL) Metrics and Risk Measures Pacific Northwest National Laboratory**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.ntis.gov/ordering.htm>>. Acesso em: 13 set. 2020.
- EPA. **LIFE CYCLE ENGINEERING GUIDELINES**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?dirEntryId=63337&keyword=life+AND+processes+AND+management&actType=&TIMSType=+&TIMSSubTypeID=&DEID=&epaNumber=&ntisID=&archiveStatus=Both&ombCat=Any&dateBeginCreated=&dateEndCreated=&dateBeginPublishedP](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=63337&keyword=life+AND+processes+AND+management&actType=&TIMSType=+&TIMSSubTypeID=&DEID=&epaNumber=&ntisID=&archiveStatus=Both&ombCat=Any&dateBeginCreated=&dateEndCreated=&dateBeginPublishedP)>. Acesso em: 22 abr. 2018.
- ERTO, P.; GUIDA, M. Estimation of weibull reliability from few life tests. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 1, n. 3, p. 161–164, jul. 1985.
- FAGERBERG, J. Mobilizing innovation for sustainability transitions: A comment on transformative innovation policy. **Research Policy**, v. 47, n. 9, p. 1568–1576, 2018.
- FAVI, C.; CAMPI, F.; GERMANI, M. Comparative life cycle assessment of metal arc welding technologies by using engineering design documentation. **International Journal of Life Cycle Assessment**, p. 2140–2172, 2019.
- FAZENDA, M. DA. ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ACIDENTES DO TRABALHO AEAT 2017. **SER Social**, n. 11, p. 996, 2017.
- FAZENDA, S. **CNAE - Fiscal - Código Nacional de Atividade Econômica - Secretaria de Economia do Distrito Federal**. Disponível em: <[http://www.fazenda.df.gov.br/area.cfm?id\\_area=611](http://www.fazenda.df.gov.br/area.cfm?id_area=611)>. Acesso em: 28 nov. 2019.
- FERNANDES, P. T.; CANGIOLIERI JÚNIOR, O.; SANT'ANNA, Â. M. O. Method for integrated product development oriented to sustainability. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 19, n. 3, p. 775–793, 19 abr. 2017.
- FINK, A. et al. The future scorecard: Combining external and internal scenarios to create strategic foresight. **Management Decision**, v. 43, n. 3, p. 360–381, 2005.
- FINK, L. **Larry Fink's Letter to CEOs BlackRock**. [s.l.: s.n.].
- FINKBEINER, M. et al. Towards life cycle sustainability assessment.

**Sustainability**, v. 2, n. 10, p. 3309–3322, 2010.

FISCHER, M. (FRAUNHOFER I. Life cycle engineering. **Fraunhofer IBP**, 2014.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. 1ª Edição ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

FOUNDATION, E. M. **Towards a circular economy: business rationale for an accelerated transition** Ellen Macarthur Foundation. [s.l: s.n.].

FULLER, D. A.; OTTMAN, J. A. Moderating unintended pollution: The role of sustainable product design. **Journal of Business Research**, v. 57, n. 11, p. 1231–1238, 1 nov. 2004.

FYE, S. R. et al. An examination of factors affecting accuracy in technology forecasts. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 80, n. 6, p. 1222–1231, 2013.

GABI. **Life Cycle Assessment LCA Software**. Disponível em: <<http://www.gabi-software.com/international/index/>>. Acesso em: 27 nov. 2019.

GAO, L. et al. Technology life cycle analysis method based on patent documents. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 80, n. 3, p. 398–407, 2013.

GENIE. GeNie Modeler User Manual. **BayesFusion**, v. 1st, p. 614, 2020.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 11–32, 15 fev. 2016.

GLOBALDATA. **Sustainability - The Most Important Theme for 2020 - Thematic Research**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://store.globaldata.com/report/gdtmt-tr-s252--sustainability-the-most-important-theme-for-2020-thematic-research/>>. Acesso em: 7 jul. 2020.

GNANSOUNOU, E.; ALVES, C. M. Social Assessment of Biofuels. In: **Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 123–139.

GOLHATH, L. et al. **COMPARAÇÃO ANALÍTICA ENTRE MÉTODOS DE APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO (AMD)**. Anais do 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA / 2007. **Anais...São José dos Campos**: 2007

GOSHU, A. T. Derivation of Inflection Points of Nonlinear Regression Curves - Implications to Statistics. **American Journal of Theoretical and Applied Statistics**, v. 2, n. 6, p. 268, 1 jan. 2013.

GÖTZE, U. et al. Life Cycle Engineering and Management - Fostering the Management-orientation of Life Cycle Engineering Activities. **Procedia CIRP**, v. 61, p. 134–139, 2017.

GOUMAS, M.; LYGEROU, V. An Extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects. **European Journal of Operational Research**, v. 123, n. 3, p. 606–613, jun. 2000.

- GROIS, E. et al. **Bayesian network models for generation of crisis management training scenarios**. Innovative Applications of Artificial Intelligence - Conference Proceedings. **Anais...1998** Disponível em: <[www.aaai.org](http://www.aaai.org)>. Acesso em: 27 set. 2020
- GRUNDY, T. Rethinking and reinventing Michael Porter's five forces model. **Strategic Change**, v. 15, n. 5, p. 213–229, 1 ago. 2006.
- GUO, M.; MURPHY, R. J. LCA data quality: Sensitivity and uncertainty analysis. **Science of the Total Environment**, v. 435–436, p. 230–243, 1 out. 2012.
- GÜRSEL, G. Healthcare, uncertainty, and fuzzy logic. **Digital Medicine**, v. 2, n. 3, p. 101, 2016.
- HAIMES, Y. Y. On the definition of resilience in systems. **Risk Analysis**, v. 29, n. 4, p. 498–501, abr. 2009.
- HAKOVIRTA, M.; DENUWARA, N. **How COVID-19 redefines the concept of sustainability** **Sustainability (Switzerland)** MDPI AG, , 4 maio 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/9/3727>>. Acesso em: 7 jul. 2020
- HALLSTEDT, S.; PIGOSSO, D. **Sustainability integration in a technology readiness assessment framework**. Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED. **Anais...2017**
- HALOG, A.; MANIK, Y. Advancing integrated systems modelling framework for life cycle sustainability assessment. **Sustainability**, v. 3, n. 2, p. 469–499, 2011.
- HANSEN, C. T.; ANDREASEN, M. M. **A MAPPING OF DESIGN DECISION-MAKING**. Internetaional Design Conference - design 2004. **Anais...2004** Disponível em: <<https://www.designsociety.org/publication/19931/A+MAPPING+OF+DESIGN+DECISION-MAKING>>. Acesso em: 21 abr. 2018
- HAUPT, R.; KLOYER, M.; LANGE, M. Patent indicators for the technology life cycle development. **Research Policy**, v. 36, n. 3, p. 387–398, 2007.
- HAUSCHILD, M. Z.; DREYER, L. C.; JØRGENSEN, A. Assessing social impacts in a life cycle perspective-Lessons learned. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, n. 1, p. 21–24, 2008.
- HAUSCHILD, M. Z.; HERRMANN, C.; KARA, S. An Integrated Framework for Life Cycle Engineering. **Procedia CIRP**, v. 61, p. 2–9, 2017.
- HECKERMAN, D.; BREESE, J. S. Causal independence for probability assessment and inference using Bayesian networks. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans.**, v. 26, n. 6, p. 826–831, 1996.
- HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; GUINÉE, J. B. Life cycle assessment and sustainability analysis of products, materials and technologies. Toward a scientific framework for sustainability life cycle analysis. **Polymer Degradation and Stability**, v. 95, n. 3, p. 422–428, 1 mar. 2010.
- HERRMANN, C. et al. Life cycle engineering and sustainable manufacturing.

**Journal of Industrial Ecology**, v. 18, n. 4, p. 471–477, 2014.

HERVA, M.; ROCA, E. Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 39, p. 355–371, 2012.

HISCHIER, R. et al. **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods.ecoinvent report No. 3, v2.2 Swiss Centre for Life Cycle Inventories, DübendorfEcoinvent**. [s.l.: s.n.].

HO, L. L.; SILVA, A. F. DA. Estimadores não viciados para o tempo médio até a falha e para percentis obtidos do modelo de regressão de Weibull. **Gestão & Produção**, v. 12, n. 1, p. 97–105, abr. 2005.

HOEK, R. VAN. Responding to COVID-19 Supply Chain Risks—Insights from Supply Chain Change Management, Total Cost of Ownership and Supplier Segmentation Theory. **Logistics**, v. 4, n. 4, p. 23, 23 set. 2020.

HONKALA, S.; HÄMÄLÄINEN, M.; SALONEN, M. Comparison of Four Existing Concept. **International Conference on Engineering Design - ICED'07**, n. August, p. 1–11, 2007.

HOSSEINI, S.; BARKER, K. A Bayesian network model for resilience-based supplier selection. **International Journal of Production Economics**, v. 180, p. 68–87, 2016.

HOSSEINI, S.; BARKER, K.; RAMIREZ-MARQUEZ, J. E. A review of definitions and measures of system resilience. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 145, p. 47–61, 1 jan. 2016.

HOSSEINI, S.; IVANOV, D. Bayesian networks for supply chain risk, resilience and ripple effect analysis: A literature review. **Expert Systems with Applications**, v. 161, 15 dez. 2020.

HOWARD, R. A. The Foundations of Decision Analysis. **IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics**, v. 4, n. 3, p. 211–219, 1968.

HSU, P. L.; ROBBINS, H. Complete Convergence and the Law of Large Numbers. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 33, n. 2, p. 25–31, 1 fev. 1947.

HUANG, L. Growth kinetics of *Listeria monocytogenes* in broth and beef frankfurters - Determination of lag phase duration and exponential growth rate under isothermal conditions. **Journal of Food Science**, v. 73, n. 5, jun. 2008.

INSEAD. **GII-2007-Report.pdf**, 2007.

INTEPE, G.; BOZDAG, E.; KOC, T. The selection of technology forecasting method using a multi-criteria interval-valued intuitionistic fuzzy group decision making approach. **Computers and Industrial Engineering**, v. 65, n. 2, p. 277–285, 2013.

IONICA, A. C.; LEBA, M. QFD Integrated in New Product Development - Biometric Identification System Case Study. **Procedia Economics and Finance**, v. 23, n. October 2014, p. 986–991, 2015.

ISHII, K. Life-Cycle Engineering Design. **Journal of Mechanical Design**, v.

117, n. B, p. 42–47, jun. 1995.

JAMALI, M. Y. et al. Analysis of photovoltaic technology development based on technology life cycle approach. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 8, n. 3, 2016.

JANSEN, L. K. C.; SHIMIZU, T.; JANSEN, J. U. Uma análise de investimentos considerando fatores intangíveis. **Revista Produção Online**, v. 4, n. 4, ago. 2004.

JANSSENS, D. et al. Integrating Bayesian networks and decision trees in a sequential rule-based transportation model. **European Journal of Operational Research**, v. 175, n. 1, p. 16–34, 16 nov. 2006.

JENSEN, F.; LAURITZEN, S.; OLESEN, K. Bayesian Updating in Recursive Graphical Models by Local Computations. **Computational Statistical Quarterly**, v. 4, p. 269–282, 1990.

JESUS, G. T.; JR., M. F. C. Integration Readiness levels Evaluation and Systems Architecture: A Literature Review. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 5, n. 4, p. 73–84, 2018.

JIANG, R. **Springer Series in Reliability Engineering Introduction to Quality and Reliability Engineering**. Beijing: Springer, 2015.

JØRGENSEN, A. et al. Methodologies for social life cycle assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 2, p. 96–103, 7 mar. 2008.

JR, M. F. S. ET AL. **Cableless Intelligent Well Completion Development Based on Reliability**. OTC Brasil. **Anais...**Rio de Janeiro: Offshore Technology Conference, 2017

KABACOFF, R. I. **R in Action Data analysis and graphics with R**. [s.l: s.n.].

KALUZA, A. et al. **Analyzing decision-making in automotive design towards life cycle engineering for hybrid lightweight components**. (P. Sivaloganathan, S and Andrews, Ed.)Procedia CIRP. **Anais...**1 BIRDCAGE WALK, WESTMINISTER SW1H 9JJ, ENGLAND: PROFESSIONAL ENGINEERING PUBLISHING LTD, 2016Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.029>>

KALUZA, A. et al. **Concurrent Design & Life Cycle Engineering in Automotive Lightweight Component Development**. Procedia CIRP. **Anais...**2017

KAPLAN, E. L.; MEIER, P. Nonparametric Estimation from Incomplete Observations. **Journal of the American Statistical Association**, v. 53, n. 282, p. 457, jun. 1958.

KAUFMANN, K. W. Fitting and using growth curves. **Oecologia**, v. 49, n. 3, p. 293–299, 1981.

KEEBLE, B. R. **The Brundtland Report: “Our Common Future”**. 1st (May 2 ed. New York: Oxford University Press, 1988. v. 4

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. **Decisions with Multiple Objectives**. [s.l.]

Cambridge University Press, 1993.

KJÆR, L. L. et al. From LCC to LCA using a hybrid Input Output model - A maritime case study. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 474–479, 2015.

KLEIN, M. J.-S. et al. **Product Modelling for Design Alternatives Selection Using Optimisation and Robustness Analysis**. International Conference on Engineering Design, ICED'07. **Anais...2007** Disponível em: <<https://www.designsociety.org/publication/25388/Product+Modelling+for+Design+Alternatives+Selection+Using+Optimisation+and+Robustness+Analysis>>. Acesso em: 21 abr. 2018

KLOCKE, F. et al. Simplified life cycle assessment of a hybrid car body part. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 484–489, 2014.

KOIFMAN, S.; BLANK, V. L.; DE MORAES SOUZA, J. A. Mortalidade e acidentes de trabalho na indústria elétrica. **Revista de Saude Publica**, v. 17, n. 2, p. 83–93, abr. 1983.

KRISPIN, R. **Hands-On Time Series Analysis with R : Perform Time Series Analysis and Forecasting Using R**. 1st. ed. Birmingham: Packt Publishing, 2019.

KUCHARAVY, D.; DE GUIO, R. Logistic substitution model and technological forecasting. **Procedia Engineering**, v. 9, p. 402–416, 2011.

KUCHARAVY, D.; DE GUIO, R. **Application of logistic growth curve**. **Procedia Engineering**. **Anais...Elsevier B.V.**, 2015 Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-47549086948&partnerID=40&md5=5ad907ec218ec88c14e6bf1de3d58335>>

KUZEMKO, C. et al. Covid-19 and the Politics of Sustainable Energy Transitions. **Energy Research & Social Science**, p. 101685, 2 jul. 2020.

KYEBAMBE, M. N. et al. Forecasting emerging technologies: A supervised learning approach through patent analysis. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 125, n. November 2016, p. 236–244, 2017.

LANDIS, A. E.; THEIS, T. L. **Comparison of life cycle impact assessment tools in the case of biofuels**. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. **Anais...2008**

LAURITZEN, S. L.; SPIEGELHALTER, D. J. Local Computations with Probabilities on Graphical Structures and Their Application to Expert Systems. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 50, n. 2, p. 157–224, 1988.

LE QUÉRÉ, C. et al. Temporary reduction in daily global CO2 emissions during the COVID-19 forced confinement. **Nature Climate Change**, v. 10, n. 7, p. 647–653, 1 jul. 2020.

LEE, C. et al. Stochastic technology life cycle analysis using multiple patent indicators. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 106, p. 53–64, 2016.

LEE, C. et al. Patterns of technology life cycles: stochastic analysis based on patent citations. **Technology Analysis and Strategic Management**, v. 29, n. 1, p. 53–67, 2 jan. 2017.

LEE, D.; PAN, R. A nonparametric Bayesian network approach to assessing system reliability at early design stages. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 171, p. 57–66, 1 mar. 2018.

LEIMEISTER, M.; KOLIOS, A. A review of reliability-based methods for risk analysis and their application in the offshore wind industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, n. April, p. 1065–1076, 2018.

LI, H.; GUEDES SOARES, C.; HUANG, H. Z. Reliability analysis of a floating offshore wind turbine using Bayesian Networks. **Ocean Engineering**, v. 217, p. 107827, 1 dez. 2020.

LI, J. **Scaling up concentrating solar thermal technology in China**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Pergamon, , 1 out. 2009.

LI, S. et al. A Bayesian Network Based Adaptability Design of Product Structures for Function Evolution. **Applied Sciences**, v. 8, n. 4, p. 493, 2018.

LIMA, M. D. C. **Método de discretização de variáveis para redes bayesianas utilizando algoritmos genéticos**. [s.l.: s.n.].

LITTLE, A. D. The strategic management of technology. **European Management Forum**, 1981.

LIU, H. C. et al. Failure mode and effect analysis using multi-criteria decision making methods: A systematic literature review. **Computers and Industrial Engineering**, v. 135, n. October 2018, p. 881–897, 2019.

LOAYZA, N. V.; PENNING, S. **Macroeconomic Policy in the Time of COVID-19**. [s.l.] World Bank, 2020.

LU, M. W.; WANG, C. J. Weibull data analysis with few or no failures. In: **Springer Series in Reliability Engineering**. [s.l.] Springer-Verlag London Ltd, 2008. v. 18p. 201–210.

LU, Y. et al. Reliability in a time-driven product development process. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 15, n. 6, p. 427–430, 1 nov. 1999.

LUVALLE, M. J.; LEFEVRE, B. G.; KANNAN, S. **Design and analysis of accelerated tests for mission critical reliability**. [s.l.] Chapman & Hall/CRC, 2004.

MADVAR, M. D. et al. Patent-based technology life cycle analysis: The case of the petroleum industry. **Foresight and STI Governance**, v. 10, n. 4, p. 72–79, 25 dez. 2016.

MANN, D. L. Better technology forecasting using systematic innovation methods. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 70, n. 8, p. 779–795, out. 2003.

MARANDUBA, H. L. et al. Uso da Lógica Fuzzy na avaliação da viabilidade do ciclo de vida do biodiesel. **LALCA - Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, p. 22, 2017.

MÄRKÄLÄ, M.; JUMPPONEN, J. **Evaluation of the Suitability of AHP in Studying Transit Route Selection Criteria**. Taipalsari - Finland: [s.n.].

Disponível em:

<[http://www.ek0.ru/LUT/171\\_contemporary\\_research\\_issues.pdf#page=56](http://www.ek0.ru/LUT/171_contemporary_research_issues.pdf#page=56)>.

Acesso em: 27 set. 2020.

MARLYANA, N.; TONTOWI, A. E.; YUNIARTO, H. A. **A Quantitative Analysis of System Readiness Level Plus (SRL+): Development of Readiness Level Measurement**. MATEC Web of Conferences. **Anais...EDP Sciences**, 30 mar. 2018Disponível em: <<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>. Acesso em: 2 set. 2020

MARQUEZ, D.; NEIL, M.; FENTON, N. Improved reliability modeling using Bayesian networks and dynamic discretization. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 95, n. 4, p. 412–425, 2010.

MARTINO, J. P. **Technological Forecasting for Decision Making**. 3rd. ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

MATURANA, M. C. **Aplicação de Redes Bayesianas na análise da contribuição do erro humano em acidentes de colisão**. São Paulo: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, set. 2010.

MAURICIO-MORENO, H. et al. Design S3-RF (Sustainable x Smart x Sensing - Reference Framework) for the future manufacturing enterprise. **IFAC-PapersOnLine**, v. 28, n. 3, p. 58–63, 2015.

MAZZUCHI, T. A.; SOYER, R. **Reliability assessment and prediction during product development**. Annual Reliability and Maintainability Symposium 1992 Proceedings. **Anais...IEEE**, 2003Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/187866/>>. Acesso em: 3 abr. 2019

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. **Cradle to cradle : remaking the way we make things**. [s.l.] North Point Press, 2009.

MCNAUGHT, K. R.; ZAGORECKI, A. **Using dynamic Bayesian networks for prognostic modelling to inform maintenance decision making**. IEEM 2009 - IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. **Anais...2009**

MEEKER, W. Q. et al. Accelerated degradation tests: modeling and analysis. **Technometrics**, v. 40, n. 2, p. 89–99, 1998.

MELLO, J. C. C. B. S. DE; GOMES, E. G.; LINS, M. P. E. Análise multicritério da presença da Universidade Federal Fluminense com o uso do método Macbeth. **Production**, v. 11, n. 2, p. 53–67, 2001.

MICROSOFT. **Microsoft Power BI Desktop**Microsoft Corporation, , 2020.

MIN, H. International Supplier Selection: A Multi-attribute Utility Approach. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 24, n. 5, p. 24–33, jun. 1994.

MODARRES, M. **What every engineer should know about Reliability and Risk Analysis**. [s.l: s.n.]. v. 53

MODARRES, M.; KAMINSKIY, M. P.; KRIVTSOV, V. **RELIABILITY ENGINEERING and RISK ANALYSIS A Practical Guide**. Third Edit ed. Boca

Raton, Florida: Taylor & Francis - CRD Press, 2017.

MORBIDONI A., FAVI C., G. M. CAD-Integrated LCA Tool: Comparison with dedicated LCA Software and Guidelines for the Improvement. In: HESSELBACH J., H. C. (Ed.). **Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

MORBIDONI, A.; FAVI, C.; GERMANI, M. CAD-Integrated LCA Tool: Comparison with dedicated LCA Software and Guidelines for the Improvement. In: **Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing**. [s.l.] Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 569–574.

MOTA, C. M. D. M.; DE ALMEIDA, A. T. Método multicritério ELECTRE IV-H para priorização de atividades em projetos. **Pesquisa Operacional**, v. 27, n. 2, p. 247–269, 2007.

MPT; OIT. **Observatório Digital de Saúde e Segurança do Trabalho**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/mpt-e-oit-lancam-observatorio-digital-de-saude-e-seguranca-do-trabalho/>>. Acesso em: 2 dez. 2019.

MULLER, R. M.; SPILIOPOULOU, M.; LENZ, H.-J. Electronic Marketplaces of Knowledge: Characteristics and Sharing of Knowledge Assets. **Proceedings of the International Conference on Advances in Infrastructure for e-Business, e-Education and e-Medicine on the Internet**, n. July 2013, p. 1–12, 2002.

MUNIR, M. T. et al. **Resource recovery from organic solid waste using hydrothermal processing: Opportunities and challenges** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Elsevier Ltd, , 1 nov. 2018.

MUNTHE, C. I. et al. Dealing with the devil of deviation: Managing uncertainty during product development execution. **R and D Management**, v. 44, n. 2, p. 203–216, 1 mar. 2014.

MURTHY, D. N. P. A stochastic model for technology forecasting. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 14, n. 1, p. 27–37, 1979.

MUTLU, M.; TUZKAYA, G.; SENNAROĞLU, B. Multi-Criteria Decision Making Techniques for Healthcare Service Quality Evaluation: a Literature Review. **Sigma J Eng & Nat Sci**, v. 35, n. 3, p. 501–512, 2017.

NANJO, K. et al. Part agent that proposes replacement of a part considering its life cycle using a Bayesian network. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 514–519, 2014.

NASA. **NASA/SP-2106-6105 NASA Systems Engineering Handbook**. [s.l.: s.n.].

NEIL, M. et al. Using Bayesian belief networks to predict the reliability of military vehicles. **Computing & Control Engineering Journal**, v. 12, n. 1, p. 11–20, 1 fev. 2005.

NEIVA, S. B.; GOMES, L. F. A. M. A aplicação da teoria da utilidade multiatributo à escolha de um software de e-procurement. **Revista Tecnologia**, v. 28, n. 2, p. 160–171, 2007.

NELSON, W. Weibull Analysis of Reliability Data with Few or No Failures. **Journal of Quality Technology**, v. 17, n. 3, p. 140–146, jul. 1985.

- NORGATE, T. et al. Biomass as a Source of Renewable Carbon for Iron and Steelmaking. **ISIJ International**, v. 52, n. 8, p. 1472–1481, 2012.
- NORRIS, G. A; MARSHALL, H. E. Multiattribute Decision Analysis Method for Evaluating Buildings and Building Systems. **NIST Office of Applied Economics**, p. 1–82, 1995.
- O'CONNOR, P. D. T.; KLEYNER, A. **Practical reliability engineering**. [s.l.] Wiley, 2012.
- OH, J. E.; SOHN, J. K. The comparative studies on stress-strength reliability for Rayleigh distribution. **Journal of the Korean Data And Information Science Society**, v. 29, n. 4, p. 1095–1108, 2018.
- OJOAWO, S. O.; GBADAMOSI, A. A. Application of TRACI and CML Modeling Tools in Life Cycle Impact Assessment of Municipal Wastes. **Journal of Environmental Protection**, v. 04, n. 06, p. 602–617, 17 jun. 2013.
- OLIVEIRA, A. S. et al. Adding Technology Sustainability Evaluation to Product Development: A Proposed Methodology and an Assessment Model. **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. 2097, 16 fev. 2021.
- OLIVEIRA, C. L. et al. **Instituto Brasileiro de informação em Ciência e Tecnologia**. [s.l.: s.n.].
- ONU. **17 Objetivos para transformar nosso mundo | ONU Brasil**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/>>. Acesso em: 7 jul. 2020.
- ORMAZAL, MARTA JACA, CARMEN PUGA-LEAL, R. Analysis and Comparison of Life Cycle Assessment and Carbon Footprint software. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, v. 281, n. October 2017, 2014.
- OUDE LUTTIKHUIS, E. J.; TOXOPEUS, M. E.; LUTTERS, E. Effective integration of life cycle engineering in education. **Procedia CIRP**, Procedia CIRP. v. 29, p. 550–555, 2015.
- PAGANIN, L.; BORSATO, M. A Critical Review of Design for Reliability - A Bibliometric Analysis and Identification of Research Opportunities. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 1421–1428, 2017.
- PAVITT, K. Sectoral patterns of technical change: Towards a taxonomy and a theory. **Research Policy**, v. 13, n. 6, p. 343–373, 1 dez. 1984.
- PEARL, J. **Bayesian Networks**. [s.l.] MIT Press, 2003.
- PEÇAS, P. et al. A Life Cycle Engineering model for technology selection: a case study on plastic injection moulds for low production volumes. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 9, p. 846–856, mar. 2009.
- PEÇAS, P. et al. Life Cycle Engineering - Taxonomy and State-of-the-Art. **Procedia CIRP**, Procedia CIRP. v. 48, p. 73–78, 2016.
- PECAS, P.; RIBEIRO, I.; HENRIQUES, E. **LCE: a framework for an informed and sustainable decision-making process**. 2nd workshop of the cross-sectional group of the Cluster of Excellence eniPROD. **Anais...2013** Disponível em: <<http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/10523/2->

16\_LCE.pdf>

PEÇAS, P.; RIBEIRO, I.; HENRIQUES, E. Life cycle engineering for materials and technology selection: Two models, one approach. **Procedia CIRP**, *Procedia CIRP*. v. 15, p. 543–548, 2014.

PERSSON, J. G. Current Trends in Product Development. **Procedia CIRP**, v. 50, p. 378–383, 2016.

PETER, C.; SWILLING, M. Linking complexity and sustainability theories: Implications for modeling sustainability transitions. **Sustainability (Switzerland)**, v. 6, n. 3, p. 1594–1622, 2014.

PETZOLDT, T. **growthrates: Estimate Growth Rates from Experimental DataR Package**, 2019. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=growthrates>>

PHILLIPS, F. On S-curves and tipping points. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 74, n. 6, p. 715–730, 2007.

PIZZI, S. et al. Management research and the UN sustainable development goals (SDGs): A bibliometric investigation and systematic review. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, n. December, 2020.

PNUD BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/sustainable-development-goals.html>>. Acesso em: 20 set. 2020.

POHL, C. et al. Imprecision and Uncertainty in LCA. In: **Life Cycle Assessment (LCA) — Quo vadis?** [s.l.] Birkhäuser Basel, 1996. p. 51–68.

PORTER, M. The Five Competitive Forces That Shape Strategy. **Harvard Business Review**, v. 1, p. 23–41, 1996.

QIN, Y.; CUCURACHI, S.; SUH, S. Perceived uncertainties of characterization in LCA: a survey. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 9, p. 1846–1858, 1 set. 2020.

QURESHI, A. J.; GERICKE, K.; BLESSING, L. Stages in product lifecycle: Trans-disciplinary design context. **Procedia CIRP**, v. 21, p. 224–229, 2014.

RAMOS, P. L. et al. Reliability-Centered Maintenance: Analyzing Failure in Harvest Sugarcane Machine Using Some Generalizations of the Weibull Distribution. **Modelling and Simulation in Engineering**, v. 2018, 2018.

RAMOS, P. L. et al. Modeling traumatic brain injury lifetime data: Improved estimators for the Generalized Gamma distribution under small samples. **PLoS ONE**, v. 14, n. 8, 2019.

RANGEL, L. A. D.; GOMES, L. F. A. M. Multicriteria decision aid in the evaluation of candidates. **Producao**, v. 20, n. 1, p. 92–101, 2010.

RCT, R. C. T. **R: A Language and Environment for Statistical Computing** Vienna, Austria, 2018. Disponível em: <<https://www.gbif.org/tool/81287/r-a-language-and-environment-for-statistical-computing>>. Acesso em: 24 jul. 2020

RIBEIRO, I. et al. Life cycle engineering methodology applied to material selection, a fender case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 17, p. 1887–1899, 2008.

RIETKÖTTER, L. **Ending the war in multi-criteria decision analysis: Taking the best from two worlds The development and evaluation of guidelines for the use of MACBETH in multi-criteria group decision making for the assessment of new medical products**. [s.l.] Twente, 2014.

ROY, B.; BOUYSSOU, D. Aide multicritere à la décision: méthodes et cas. Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion. **Economica, Paris, France**, 1993.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma referência para a melhoria do Processo**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Saraiva, 2006. v. 1

RUNZHEIMER, C. **Planung und Kontrolle Integrativer Produktentwicklungen**. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1999.

SAATY, T. L. Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process. In: [s.l.: s.n.]. p. 15–35.

SALES FILHO, R. L. M. et al. Stress-Strength Reliability Analysis with Extreme Values based on q-Exponential Distribution. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 33, n. 3, p. 457–477, 2017.

SALINI, S.; KENETT, R. S. Bayesian networks of customer satisfaction survey data. **Journal of Applied Statistics**, v. 36, n. 11, p. 1177–1189, nov. 2009.

SÁNCHEZ-SILVA, M.; KLUTKE, G.-A. **Reliability and Life-Cycle Analysis of Deteriorating Systems**. Cham: Springer International Publishing, 2016.

SANDIFORD, J. G. **Efficient and scalable exact inference algorithms for Bayesian networks**. [s.l.] Imperial College, 2012.

SANTANA, V. S. et al. Occupational accidents: Social insurance costs and work days lost. **Revista de Saude Publica**, v. 40, n. 6, p. 1004–1012, dez. 2006.

SANTOS, JULIO C. J.; MELO, W. DOS R. A. Indicador da qualidade do processo parada programada. **20o CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO, ABRAMAN**, n. 1, p. 1–16, 2005.

SARAVI, M. et al. **Estimating cost at the conceptual design stage to optimize design in terms of performance and cost**. Collaborative Product and Service Life Cycle Management for a Sustainable World - Proceedings of the 15th ISPE International Conference on Concurrent Engineering, CE 2008. **Anais...** Springer-Verlag London Ltd, 2008Disponível em: <[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84800-972-1\\_11](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84800-972-1_11)>

SARTORI, S.; LATRÔNICO, F.; CAMPOS, L. M. S. Sustainability and sustainable development: a taxonomy in the field of literature. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 1, p. 01–22, 2011.

SAUSER, B. et al. From TRL to SRL: The concept of systems readiness levels. **Conference on Systems Engineering Research, Los Angeles, CA**, p. 1–10, 2006.

- SCHMIDT, A. M. A. Processo De Apoio a Tomada De Decisão Abordagens: AHP E MACBETH. **Universidade Federal de Santa Catarina**, p. 117, 1995.
- SCHOT, S. H. Jerk: The time rate of change of acceleration. **American Journal of Physics**, v. 46, n. 11, p. 1090–1094, 4 nov. 1978.
- SCHWARZ, G. Estimating the Dimension of a Model. **Annals of Statistics**, v. 6, n. 2, p. 461–464, 1978.
- SHEHLA, R.; KHAN, A. A. Reliability analysis using an exponential power model with bathtub-shaped failure rate function: a Bayes study. **SpringerPlus**, v. 5, n. 1, 2016.
- SINNWELL, C.; SIEDLER, C.; AURICH, J. C. Maturity model for product development information. **Procedia CIRP**, v. 79, p. 557–562, 2019a.
- SINNWELL, C.; SIEDLER, C.; AURICH, J. C. Maturity model for product development information. **Procedia CIRP**, v. 79, p. 557–562, 1 jan. 2019b.
- SMITH, M.; AGRAWAL, R. **A Comparison of Time Series Model Forecasting Methods on Patent Groups**. CEUR Workshop Proceedings. **Anais...2014**
- SONNEMANN, G. **Background Report for a UNEP Guide to Life Cycle Management**. Paris: [s.n.].
- SOVACOOOL, B. K.; FURSZYFER DEL RIO, D.; GRIFFITHS, S. Contextualizing the Covid-19 pandemic for a carbon-constrained world: Insights for sustainability transitions, energy justice, and research methodology. **Energy Research and Social Science**, v. 68, p. 101701, 1 out. 2020.
- SPATARI, S. et al. Using GaBi 3 to perform Life Cycle Assessment and Life Cycle Engineering. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 6, n. 2, p. 81–84, 2001.
- SPETZLER, C.; WINTER, H.; MEYER, J. **Decision Quality Value Creation from Better Business Decisions**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- STAMATELATOS, M. et al. Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners. **NASA/SP-2011-3421 Second Edition December 2011**, n. December, p. 431, 2011.
- STARK, R. et al. **Advanced technologies in life cycle engineering**. (A. Roy, R and Tomiyama, T and Tiwari, A and Tracht, K and Shahab, E and Shaw, Ed.)Procedia CIRP. **Anais...: Procedia CIRP.AMSTERDAM, NETHERLANDS: ELSEVIER SCIENCE BV, 2014**
- SUBHASREE CHATTERJEE. Time Series Analysis Using ARIMA Model In R . **DataScience+**, 2018.
- SUIKKI, R. **Practical use of software reliability methods in new product development**. Proceedings - 32nd Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications, SEAA. **Anais...IEEE**, ago. 2006Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1690145/>>. Acesso em: 10 abr. 2019
- TAKATA, J. T. **ANÁLISE DO MERCADO DE FUNDIÇÃO DOS METAIS**

**FERROSOS NO BRASIL Banca examinadora.** [s.l.] Fundação Getúlio Vargas - FGV, 2002.

TAO, J.; YU, S. Product Life Cycle Design for Sustainable Value Creation: Methods of Sustainable Product Development in the Context of High Value Engineering. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 25–30, 2018.

TEGELTIJA, M. et al. Exploring Deep Uncertainty Approaches for Application in Life Cycle Engineering. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 457–462, 2018.

THOMA, G. J.; ELLSWORTH, S. W.; YAN, M. J. Chapter 1: Principles of Green Food Processing (Including Lifecycle Assessment and Carbon Footprint). **RSC Green Chemistry**, v. 2018-Janua, n. 53, p. 1–52, 2018.

THOMÉ, A. M. T. et al. Sustainable new product development: a longitudinal review. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 18, n. 7, p. 2195–2208, 2016.

TORABI, R.; MORADI, P.; KHANTAIMOORI, A. R. Predict Student Scores Using Bayesian Networks. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 46, p. 4476–4480, 1 jan. 2012.

TRAPPEY, C. V. et al. Using patent data for technology forecasting: China RFID patent analysis. **Advanced Engineering Informatics**, v. 25, n. 1, p. 53–64, 2011.

TRIVEDI, K. S. Continuous Random Variables (Chapter 3). In: **Probability and Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Applications**. 2nd Editio ed. [s.l: s.n.]. p. 65–76.

UUSITALO, L. Advantages and challenges of Bayesian networks in environmental modelling. **Ecological Modelling**, v. 203, n. 3–4, p. 312–318, 10 maio 2007.

VALERDI, R.; KOHL, R. J. **An Approach to Technology Risk Management**. Engineering Systems Division Symposium. **Anais...2004**

VEIT-EGERER, R. et al. Lce-analysis of existing anticorrosive coated bridges based on the parameters ageing, remaining load bearing capacity & reliability as a basis for an adaptation of the future maintenance strategy. **Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure - 5th International Symposium on Life-Cycle Engineering, IALCCE 2016**, n. October, p. 1138–1145, 2017.

VINNE, J. E. **Offshore risk assessment. Volume 2, Principles, modelling and applications of QRA studies**. Third Edit ed. [s.l: s.n.].

WANG, K. S.; WAN, E. H.; YANG, W. G. A preliminary investigation of new mechanical product development based on reliability theory. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 40, n. 2, p. 187–194, 1 jan. 1993.

WANYAMA, W. et al. Life-cycle engineering: Issues, tools and research. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 16, n. 4–5, p. 307–316, 2003.

WARD, M. et al. Three dimensions of maturity required to achieve future state, technology-enabled manufacturing supply chains. **Proceedings of the**

**Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 232, n. 4, p. 605–620, 1 mar. 2018.

WIESNER, M. Sustainable Product Development. In: VAJNA, S. (Ed.). . **Integrated Design Engineering**. 1st. ed. Cham: Springer, Cham, 2020. p. 41–381.

WILDER, J. et al. S-Curve Analysis and the Technology Life Cycle : Application in Series of Data of Articles and Patents. **Espacios**, v. 37, n. N° 07, p. 19, 2016.

WIPO. WIPO Guide to Using PATENT. **WIPO publications**, p. 1–43, 2015.

WIPO; INSEAD; CORNELL. **GLOBAL INNOVATION INDEX 2019 GLOBAL INNOVATION INDEX 2019**. Geneva: [s.n.].

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Coronavirus disease (COVID-19) Weekly Epidemiological Update Global epidemiological situation**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/situation-reports>>. Acesso em: 7 out. 2020.

XIA, X. Reliability Evaluation of Failure Data with Poor Information. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 40, n. 4, p. 104407, jul. 2012.

XIN'AN, W.; AIJUN, M. Comparison of four nonlinear growth models for effective exploration of growth characteristics of turbot *Scophthalmus maximus* fish strain. **African Journal of Biotechnology**, v. 15, n. 40, p. 2251–2258, 2016.

XIUXU, Z. et al. **Technology Life Cycle Forecasting of Chinese Hydraulic Components Based on Patent Analysis The Forecasting of Chinese Hydraulic Cylinder Patent Development**. 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATION AND MANAGEMENT. **Anais...2015**

XUEGANG, L. A Reliability Prediction Method Based on Simulation Analysis. **Procedia Engineering**, v. 99, p. 219–223, 2015.

YADAV, O. P. et al. A fuzzy logic based approach to reliability improvement estimation during product development. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 80, n. 1, p. 63–74, 1 abr. 2003.

YAN, P.; ZHOU, M.; SEBASTIAN, D. An integrated product and process development methodology: Concept formulation. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 15, n. 3, p. 201–210, 1999.

YANG, Q. et al. Bayesian network approach to customer requirements to customized product model. **Discrete Dynamics in Nature and Society**, v. 2019, 2019.

YANG, Q.; YU, S.; SEKHARI, A. A modular eco-design method for life cycle engineering based on redesign risk control. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 56, n. 9–12, p. 1215–1233, 2011.

YANG, X.; YU, X.; LIU, X. Obtaining a sustainable competitive advantage from patent information: A patent analysis of the graphene industry. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 12, 2018.

YASSERI, S. Subsea system readiness level assessment. **Underwater**

**Technology**, v. 31, n. 2, p. 77–92, mar. 2013.

YE, J. *Technology Qualification ( TQ )*. p. 1–32, 2016.

YOON, J. et al. **Tracing evolving trends in printed electronics using patent information***Journal of Nanoparticle Research*Kluwer Academic Publishers, , 2014.

YULING, C.; KHAN, A. W. A case study: Reliability-based product development and improvement model. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 24, n. 3, p. 361–373, 1 abr. 2008.

ZAMAGNI, A. et al. **Social Life Cycle Assessment**. [s.l.: s.n.].

ZARTHA, J. W. et al. Ciclo de vida de tecnologías y curvas en S aplicadas en subproductos de la agroindustria piscícola. **Informacion Tecnologica**, v. 28, n. 2, p. 105–114, 2017.

ZHOU, Y.; FENTON, N.; NEIL, M. Bayesian network approach to multinomial parameter learning using data and expert judgments. **International Journal of Approximate Reasoning**, v. 55, n. 5, p. 1252–1268, 2014.

ZHU, J. Y.; DESHMUKH, A. Application of Bayesian decision networks to life cycle engineering in Green design and manufacturing. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 16, n. 2 SPEC., p. 91–103, mar. 2003.

APÊNDICES

## A. REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

A revisão sistemática de literatura segue um processo descrito por (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011). A Figura 37 abaixo apresentada o modelo esquemático do mesmo.



Figura 37 Modelo para revisão bibliográfica sistemática

Fonte:(CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011)

O objetivo desta revisão foi identificar artigos e demais publicações relevantes que tratam do objeto do presente estudo. A pesquisa realizada considerou as fontes Web of Science e ScienceDirect. O método de busca aplicou funcionalidades por tópico, truncamento e booleanos. Essas funcionalidades avançadas fizeram com que a pesquisa fosse refinada, inclusive, podendo fazer diversas combinações com as palavras buscadas. As palavras-chave selecionadas foram:

- “*Life cycle engineering*”
- [“*Technology life cycle*” OR “*Technology forecasting*”]
- [“*Integrated product development*” OR “*Product development*”]
- “*Complex Systems*”
- [“*Framework*” OR “*Model\**” OR “*Method\**”]
- “Reliability”
- “Decision Making”

A revisão sistemática foi realizada no dia 12/04/2018 e considerou o período de 1945 a 2018 (até o momento da busca). A pesquisa sobre mais atualizações no dia 02/04/2019 e no dia 05/04/2020. Esta última com a inclusão de artigo selecionados especificamente para análise de publicações relativas ao processo de tomada de decisão. A fase de processamento, conforme explicitado na Figura 37 é um processo iterativo e pode ser melhor detalhado na Figura 38.



Figura 38 Procedimento iterativo da fase de processamento

Fonte: (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011).

Todo o histórico da busca, que utilizou palavras-chave isoladas e/ou combinadas foram registrados com o objetivo de se documentar o trabalho realizado, facilitando as atualizações ao longo do tempo. O quadro resumo dos resultados pode ser verificado na Tabela 32, tendo como base a aplicação dos filtros apontados na Figura 38 Procedimento iterativo da fase de processamento. Após o uso desses critérios, 99 artigos foram selecionados para a etapa de priorização. Os artigos repetidos foram excluídos e sua gestão realizada através do software Mendeley Desktop®.

Tabela 32 Resumo da revisão sistemática de literatura

FONTES	FILTRO 1	FILTRO 2	FILTRO 3
Web of Science	2289	1562	220
ScienceDirect	18797	694	89

Fonte: Elaboração própria (2020)

Para melhor análise e visualização, gráficos temporais, por autor e por publicação foram elaborados e podem ser observados na Figura 39, na Figura 40 e na Figura 41. Em conjunto revelam a contemporaneidade e multidisciplinaridade do tema, além da diversidade de autores envolvidos com o mesmo.

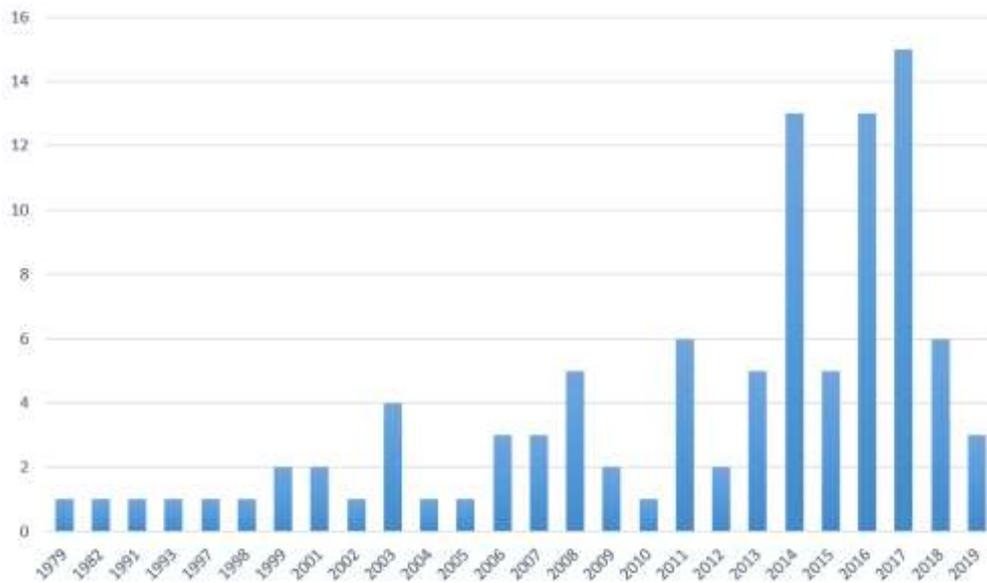


Figura 39 Número de artigos por ano

Fonte: Elaboração própria, 2019.

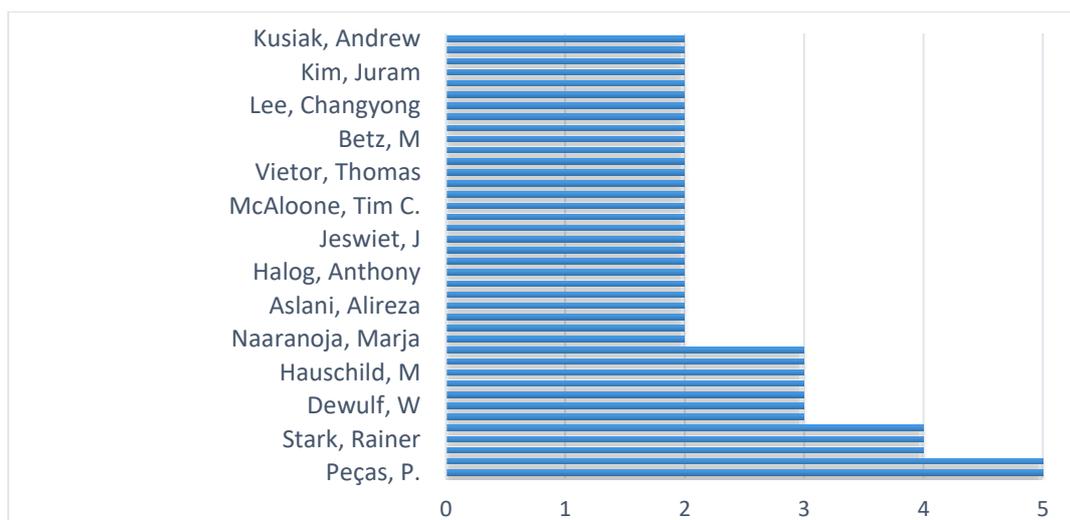


Figura 40 Autores com mais publicações

Fonte: Elaboração própria, 2019.

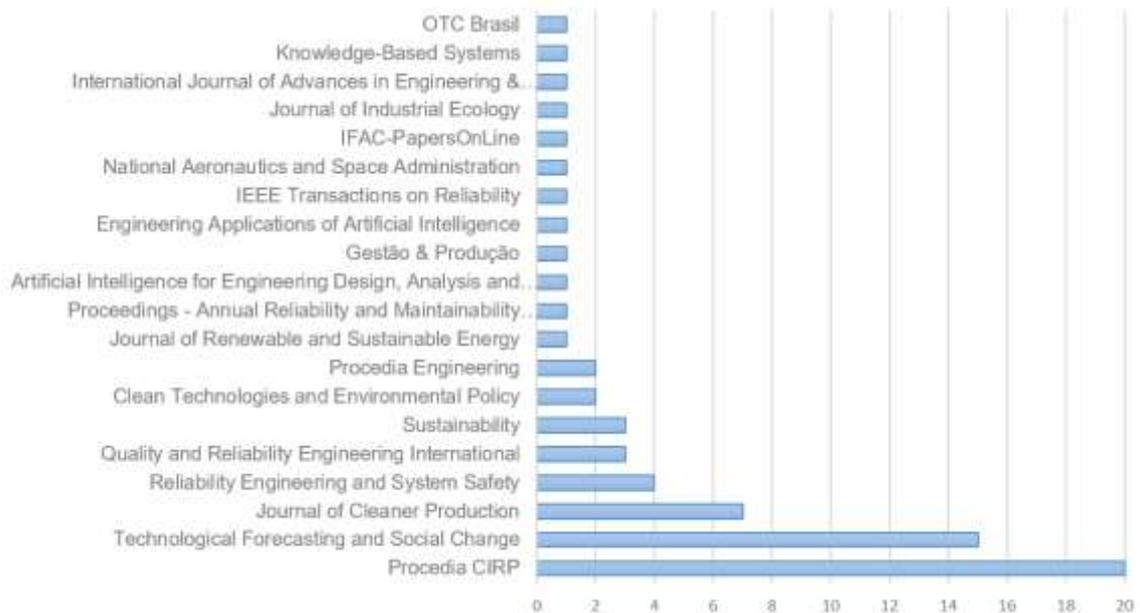


Figura 41 Número de artigos por revista

Fonte: Elaboração própria, 2019.

A análise qualitativa dos trabalhos selecionados, foi feita a partir das respostas de perguntas pré-determinadas, atribuindo as respostas “Sim (S)”, “Parcial (P)” e “Não (N)” e os respectivos pontos “1”, “0,5” e “0” aos mesmos. Sendo assim, quanto mais alto o valor do artigo, mais alinhado e relevante ao conteúdo da pesquisa. Portanto, através das perguntas abaixo listadas, estabeleceu-se os critérios de inclusão e exclusão de artigos:

**P1:** Todas as dimensões propostas (ambiental, social, econômica e tecnológica) para a LCE são utilizadas?

**P2:** É utilizada alguma técnica de sistemas complexos?

**P3:** O artigo faz referência a aplicação no desenvolvimento de produto?

**P4:** A variável confiabilidade é utilizada no artigo?

A Tabela 33 apresenta os trabalhos selecionados e suas respectivas avaliações. Até o momento foram priorizadas 99 publicações.

Tabela 33 Artigos priorizados

#	Título	P1	P2	P3	P4	Total
1	Bayesian Inference for NASA Probabilistic Risk and Reliability Analysis	0,0	1,0	1,0	1,0	<b>3,0</b>
2	Cableless Intelligent Well Completion Development Based on Reliability	0,5	0,5	1,0	1,0	<b>3,0</b>
3	A preliminary investigation of new mechanical product development based on reliability theory	0,0	1,0	1,0	1,0	<b>3,0</b>
4	Reliability assessment and prediction during product development	0,0	0,5	1,0	1,0	<b>2,5</b>
5	Using Bayesian belief networks to predict the reliability of military vehicles	0,0	0,5	1,0	1,0	<b>2,5</b>
6	Application of Bayesian decision networks to life cycle engineering in Green design and manufacturing	0,5	1,0	1,0	0,0	<b>2,5</b>
7	Modeling to support reliability enhancement during product development with applications in the U.K. Aerospace industry	0,0	0,5	1,0	1,0	<b>2,5</b>
8	Uma metodologia bayesiana para estudos de confiabilidade na fase de projeto: aplicação em um produto eletrônico	0,0	0,5	1,0	1,0	<b>2,5</b>
9	Multi-Objective and Multi-Stage Reliability Growth Planning in Early Product-Development Stage	0,0	0,5	1,0	1,0	<b>2,5</b>
10	ESTIMATION OF STRESS-STRENGTH MODEL FOR GENERALIZED INVERTED EXPONENTIAL DISTRIBUTION USING RANKED SET SAMPLING	0,0	1,0	0,5	1,0	<b>2,5</b>
11	Investigating product development process reliability and robustness using simulation	0,0	0,5	1,0	1,0	<b>2,5</b>
12	A Critical Review of Design for Reliability - A Bibliometric Analysis and Identification of Research Opportunities	0,0	0,5	1,0	1,0	<b>2,5</b>
13	Practical use of software reliability methods in new product development	0,0	0,5	1,0	1,0	<b>2,5</b>
14	Use of heritage data and other partially applicable information in reliability prediction of systems under development	0,0	0,5	1,0	1,0	<b>2,5</b>
15	Reliability in a time-driven product development process	0,0	0,5	1,0	1,0	<b>2,5</b>
16	A case study: Reliability-based product development and improvement model	0,0	0,5	1,0	1,0	<b>2,5</b>
17	A fuzzy logic based approach to reliability improvement estimation during product development	0,0	0,5	1,0	1,0	<b>2,5</b>
18	A nonparametric Bayesian network approach to assessing system reliability at early design stages	0,0	0,5	1,0	1,0	<b>2,5</b>
19	A product development model: from a reliability engineering viewpoint	0,0	0,5	1,0	1,0	<b>2,5</b>
20	The selection of technology forecasting method using a multi-criteria interval-valued intuitionistic fuzzy group decision making approach	0,5	1,0	0,5	0,0	<b>2,0</b>
21	Integrating life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) in the early phases of aircraft structural design: an elevator case study	0,5	0,5	1,0	0,0	<b>2,0</b>
22	CDMF-RELSUS concept: Reliable and Sustainable products - Influences on design, manufacturing, layout integration and use phase	1,0	0,0	1,0	0,0	<b>2,0</b>
23	Part agent that proposes replacement of a part considering its life cycle using a Bayesian network	0,5	1,0	0,5	0,0	<b>2,0</b>
24	Multi-criteria decision making as a tool for sustainable product development - Benefits and obstacles	0,5	1,0	0,5	0,0	<b>2,0</b>
25	Exploring Deep Uncertainty Approaches for Application in Life Cycle Engineering	0,5	1,0	0,5	0,0	<b>2,0</b>

Tabela 33

26	Stress-Strength Reliability Analysis with Extreme Values based on q-Exponential Distribution	0,0	0,5	0,5	1,0	<b>2,0</b>
27	The combined use of data and expert estimates in population variability analysis	0,0	0,5	0,5	1,0	<b>2,0</b>
28	Technology forecasting using structural equation modeling based data fusion: Analysis of strengths and weaknesses using a national research and education network example	0,5	0,5	0,5	0,0	<b>1,5</b>
29	Integrated Computational Life Cycle Engineering — Application to the case of electric vehicles	0,5	0,5	0,5	0,0	<b>1,5</b>
30	Sustainable new product development: a longitudinal review	0,5	0,0	1,0	0,0	<b>1,5</b>
31	Creating Shared Value how to reinvent capitalism-and unleash a wave of innovation and growth	1,0	0,0	0,5	0,0	<b>1,5</b>
32	S-Curve Analysis and the Technology Life Cycle : Application in Series of Data of Articles and Patents	0,5	1,0	0,0	0,0	<b>1,5</b>
33	Design S3-RF (Sustainable x Smart x Sensing - Reference Framework) for the future manufacturing enterprise	0,5	0,0	1,0	0,0	<b>1,5</b>
34	A fuzzy logic based aggregation method for life cycle impact assessment	0,5	1,0	0,0	0,0	<b>1,5</b>
35	Ecodesign in project management: A missing link for the integration of sustainability in product development?	0,5	0,0	1,0	0,0	<b>1,5</b>
36	A fuzzy data envelopment analysis framework for dealing with uncertainty impacts of input-output life cycle assessment models on eco-efficiency assessment	0,5	1,0	0,0	0,0	<b>1,5</b>
37	Complexity and the limits to knowledge	0,5	1,0	0,0	0,0	<b>1,5</b>
38	Analysis of photovoltaic technology development based on technology life cycle approach	0,5	0,5	0,5	0,0	<b>1,5</b>
39	Enabling product development engineers to select and combine methods for sustainable design	0,5	0,0	1,0	0,0	<b>1,5</b>
40	Current Trends in Product Development	0,5	0,0	1,0	0,0	<b>1,5</b>
41	Concurrent Design & Life Cycle Engineering in Automotive Lightweight Component Development	0,5	0,0	1,0	0,0	<b>1,5</b>
42	Life Cycle Engineering Based on Visual Analytics	0,5	0,5	0,5	0,0	<b>1,5</b>
43	Maturity model for product development information	0,0	0,5	1,0	0,0	<b>1,5</b>
44	Application of S-shaped curves	0,5	1,0	0,0	0,0	<b>1,5</b>
45	An integrated product and process development methodology: Concept formulation	0,5	0,0	1,0	0,0	<b>1,5</b>
46	A semi-Markov model with Bayesian belief network based human error probability for availability assessment of downhole optical monitoring systems	0,0	1,0	0,5	0,0	<b>1,5</b>
47	A stochastic model for technology forecasting	0,5	1,0	0,0	0,0	<b>1,5</b>
48	A Delphi technology forecasting approach using a semi-Markov concept	0,5	1,0	0,0	0,0	<b>1,5</b>
49	On S-curves and tipping points	0,5	1,0	0,0	0,0	<b>1,5</b>
50	Early identification of emerging technologies: A machine learning approach using multiple patent indicators	0,5	1,0	0,0	0,0	<b>1,5</b>
51	Identifying and monitoring the development trends of emerging technologies using patent analysis and Twitter data mining: The case of perovskite solar cell technology	0,5	0,5	0,5	0,0	<b>1,5</b>
52	Patterns of technology life cycles: stochastic analysis based on patent citations	0,5	1,0	0,0	0,0	<b>1,5</b>
53	LCE: a framework for an informed and sustainable decision-making process	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
54	Complex Systems: A Survey	0,0	1,0	0,0	0,0	<b>1,0</b>

Tabela 33

55	Sustainability and sustainable development: a taxonomy in the field of literature	1,0	0,0	0,0	0,0	<b>1,0</b>
56	Product life cycle management approach for integration of engineering design and life cycle engineering	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
57	Method for integrated product development oriented to sustainability	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
58	An introduction to agent-based modeling modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo: a review	0,0	1,0	0,0	0,0	<b>1,0</b>
59	Ciclo de vida de tecnologías y curvas en S aplicadas en subproductos de la agroindustria piscícola	0,5	0,5	0,0	0,0	<b>1,0</b>
60	A modular eco-design method for life cycle engineering based on redesign risk control	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
61	Bayesian network approach to multinomial parameter learning using data and expert judgments	0,0	1,0	0,0	0,0	<b>1,0</b>
62	Life-cycle engineering: Issues, tools and research	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
63	The technology life cycle: Conceptualization and managerial implications	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
64	Life cycle engineering methodology applied to material selection, a fender case study	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
65	A Life Cycle Engineering model for technology selection: a case study on plastic injection moulds for low production volumes	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
66	Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation	0,0	1,0	0,0	0,0	<b>1,0</b>
67	An ARIZ-based life cycle engineering model for eco-design	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
68	Making decisions: Using Bayesian nets and MCDA	0,0	1,0	0,0	0,0	<b>1,0</b>
69	Simplified life cycle assessment of a hybrid car body part	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
70	Stages in product lifecycle: Trans-disciplinary design context	0,0	0,0	1,0	0,0	<b>1,0</b>
71	Sustainable manufacturing based decision support model for product design and development process	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
72	Integrating Product and Technology Development: A Proposed Reference Model for Dual Innovation	0,0	0,0	1,0	0,0	<b>1,0</b>
73	Analyzing decision-making in automotive design towards life cycle engineering for hybrid lightweight components	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
74	Life Cycle Engineering - Taxonomy and State-of-the-Art	0,5	0,5	0,0	0,0	<b>1,0</b>
75	Improved Visualization in LCA Through the Application of Cluster Heat Maps	0,5	0,5	0,0	0,0	<b>1,0</b>
76	An Integrated Framework for Life Cycle Engineering	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
77	FORMAT - Building an original methodology for Technology Forecasting through researchers exchanges between industry and academia	0,5	0,5	0,0	0,0	<b>1,0</b>
78	Bayesian methodology for model uncertainty using model performance data	0,0	1,0	0,0	0,0	<b>1,0</b>
79	Towards life cycle sustainability assessment	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
80	Advancing integrated systems modelling framework for life cycle sustainability assessment	0,5	0,5	0,0	0,0	<b>1,0</b>
81	Technology Forecasting Using a Diffusion Model Incorporating Replacement Purchases	0,5	0,5	0,0	0,0	<b>1,0</b>
82	Linking complexity and sustainability theories: Implications for modeling sustainability transitions	0,5	0,5	0,0	0,0	<b>1,0</b>
83	Modified delphi methodology for technology forecasting: case study of electronics and information technology in India	0,5	0,5	0,0	0,0	<b>1,0</b>
84	Forecasting emerging technologies: Use of bibliometrics and patent analysis	0,5	0,5	0,0	0,0	<b>1,0</b>

Tabela 33

85	Future-oriented technology analysis: Its potential to address disruptive transformations	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
86	Technology life cycle analysis method based on patent documents	0,5	0,5	0,0	0,0	<b>1,0</b>
87	Stochastic technology life cycle analysis using multiple patent indicators	0,5	0,5	0,0	0,0	<b>1,0</b>
88	Monitoring emerging technologies for technology planning using technical keyword based analysis from patent data	0,5	0,0	0,5	0,0	<b>1,0</b>
89	A novel approach to forecast promising technology through patent analysis	0,5	0,5	0,0	0,0	<b>1,0</b>
90	Forecasting emerging technologies: A supervised learning approach through patent analysis	0,5	0,5	0,0	0,0	<b>1,0</b>
91	Technology Road mapping (TRM): a systematic review of the literature focusing on models	0,5	0,5	0,0	0,0	<b>1,0</b>
92	Life cycle engineering and sustainable manufacturing	0,5	0,0	0,0	0,0	<b>0,5</b>
93	Advanced technologies in life cycle engineering	0,5	0,0	0,0	0,0	<b>0,5</b>
94	Effective integration of life cycle engineering in education	0,5	0,0	0,0	0,0	<b>0,5</b>
95	Life Cycle Engineering and Management - Fostering the Management-orientation of Life Cycle Engineering Activities	0,5	0,0	0,0	0,0	<b>0,5</b>
96	Technological paradigms and technological trajectories. A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change	0,5	0,0	0,0	0,0	<b>0,5</b>
97	Comparative Human Health Impact Assessment of Engineered Nanomaterials in the Framework of Life Cycle Assessment	0,5	0,0	0,0	0,0	<b>0,5</b>
98	An examination of factors affecting accuracy in technology forecasts	0,5	0,0	0,0	0,0	<b>0,5</b>
99	Using GaBi 3 to perform Life Cycle Assessment and Life Cycle Engineering	0,5	0,0	0,0	0,0	<b>0,5</b>

Fonte: Elaboração própria (2020)

## B. ALGORITMO PARA ESTIMAR CURVA S

```
## Suavização de Dados utilizando Curvas de Crescimento ##
install.packages("growthrates", dependencies = TRUE)
install.packages("rootSolve")
library(dplyr); library(reshape2);library(ggplot2);library(growthcurver);library(purrr);library(readxl);
library(growthrates); library(rootSolve)
setwd("/Users/andre.soliveira/OneDrive - Sistema FIEB/PhD/A_Publicações/A Publicações 1
Capítulo de Livro concretopolimerico/TLC") # diretório # Trocar barra invertida
## C:\Users\andre.soliveira\OneDrive - Sistema FIEB\PhD\A_Publicações\A Publicações 1
Capítulo de Livro concretopolimerico\TLC
getwd() # Checar diretório de trabalho

##### https://cran.r-project.org/web/packages/growthrates/vignettes/Introduction.html
citation("growthrates")

par(mfrow=c(2,2))

# 1 BUSCAR OS DADOS #####
### IRON DATA ###
data_2019 <- read_excel("S_Iron_data_2019.xlsx", sheet="Planilha1", range = cell_cols("A:B"))
data_2019
plot(data_2019,main="Patentes Ferro Fundido - Original")
### POLYMER DATA ###
data_2019 <- read_excel("S_Polymer_data_2019.xlsx", sheet="Planilha1", range =
cell_cols("A:B"))
data_2019
plot(data_2019,main="Patentes Concreto Polimérico - Original")

# 2 SMOOTHING DAS GROWTH CURVES #####
### LOGISTIC
p <- c(y0 = 0.01, mumax = 0.2, K = 0.1)
fitlog <- fit_growthmodel(FUN = grow_logistic, p = p, data_2019$Ano, data_2019$`Número de
Patentes Acumulado`)
plot(fitlog,main="Logística")
### EXPONENTIAL
p <- c(y0 = 0.01, mumax = 0.1)
fite <- fit_growthmodel(FUN = grow_exponential, p = p, data_2019$Ano, data_2019$`Número
de Patentes Acumulado`)
plot(fite,main="Exponencial")
### RICHARDS
p <- c(y0=1, mumax=20, K=16599, beta=0.000562)
lower <- c(y0 = 0.00001, mumax = 1e-9, K = 0.005, beta = 0)
upper <- c(y0 = 10000000, mumax = 100000, K = 100000, beta = 1000000)
fitr <- fit_growthmodel(FUN = grow_richards, p = p, data_2019$Ano, data_2019$`Número de
Patentes Acumulado`,
lower = lower, upper = upper)
plot(fitr,main="Richards")
### GOMPERTZ ? grow_gompertz
p <- c(y0 = 0.01, mumax = -0.04, K = 0.01)
lower <- c(y0 = 0.001, mumax = -100, K = 0.005)
upper <- c(y0 = 100, mumax = 100, K = 1000000)
fitg1 <- fit_growthmodel(FUN = grow_gompertz, p = p, data_2019$Ano, data_2019$`Número de
Patentes Acumulado`,
lower = lower, upper = upper)
plot(fitg1,main="Gompertz")
```

```

# 3 Indicadores Estatísticos ##
##### Cálculo R^2 #####
rsquared(fitlog); rsquared(fite); rsquared(fitr); rsquared(fitg1)
##### Cálculo RMSE #####
reslog <- residuals(fitlog)^2; rese <- residuals(fite)^2; resr <- residuals(fitr)^2; resg1 <-
residuals(fitg1)^2
mean(reslog)^(1/2); mean(rese)^(1/2); mean(resr)^(1/2); mean(resg1)^(1/2)
##### Cálculo AIC #####
qtd <- count(data_2019); qtd
qtd*log10(sum(reslog))+2*3;qtd*log10(sum(rese))+2*2;
qtd*log10(sum(resr))+2*4;qtd*log10(sum(resg1))+2*3
# 4 Parâmetros para as Fórmulas das Funções ###
coef(fitlog);coef(fite);coef(fitr);coef(fitg1)
coef(fitlog) ### selecionado
summary(fitlog); summary(fite); summary(fitr); summary(fitg1)
? grow_logistic
summary(fitlog)

# 4 Derivadas, Plotar Gráficos e Encontrar Pontos de Inflexão da 2ª e da 3ª derivadas ###
## https://stackoverflow.com/questions/47087398/how-can-i-get-derivative-value-in-r
# IRON DATA LOGISTIC # plot second derivative of  $9852.4/(46.82+210.4*e^{-0.081*x}) = 0$  x =
18.4 to 18.6
f1 = expression(9852.4*(46.82+210.4*exp(-0.081*t)))
Der1 <- D(f1,'t')
Der2 <- D(Der1,'t')
Der2
Der3 <- D(Der2,'t')
Der3
# Derivadas do Ferro Fundido
# Der 2  $9852.4 * (210.4 * (exp(-0.081 * t) * 0.081 * 0.081))$ 
# Der 3  $-(9852.4 * (210.4 * (exp(-0.081 * t) * 0.081 * 0.081 * 0.081)))$ 
### https://www.r-bloggers.com/finding-multiple-roots-of-univariate-functions-in-r/

##### Derivadas de Ferro Fundido DERIVATIVES AND FUNCTIONS
f2 <- function(t){return(9852.4 * (210.4 * (exp(-0.081 * t) * 0.081 * 0.081)))}
f3 <- function(t){return(-(9852.4 * (210.4 * (exp(-0.081 * t) * 0.081 * 0.081 * 0.081)))}
## RAIZES DAS DERIVADAS DE 2ª E 3ª ORDENS
uniroot.all(f2, c(0,400))
uniroot.all(f3, c(0,400))
ggplot(data.frame(t=c(0,100)), aes(x=t)) + stat_function(fun=f1, color="blue")
ggplot(data.frame(t=c(0,400)), aes(x=t)) + stat_function(fun=f2, color="red") +
stat_function(fun=f3, color="green")
ggplot(data.frame(t=c(0,400)), aes(x=t)) + stat_function(fun=f3, color="green")

```

### C. Avaliação das 5 Forças de Porter e Capacidade de Estruturação

Avaliação das 5 Forças de Porter e Capacidade de Estruturação - Formulário de Pesquisa de Doutorado - MCTI - SENAI CIMATEC

Este formulário tem o OBJETIVO de realizar uma avaliação qualitativa em relação as 5 Forças Competitivas de Porter e Capacidade de Estruturação das Empresas que atuam no mercado de fabricação de TAMPAS DE BUEIRO utilizando FERRO FUNDIDO, comparando-as com o estágio atual do projeto CONCRETO POLIMÉRICO que foi realizado em parceria com a empresa PREALL e o SENAI CIMATEC

A realização deste questionário ocorre no âmbito do trabalho de André Souza Oliveira, Gerente Executivo - Negócios do SENAI CIMATEC e discente do Programa de Doutorado do MCTI - Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial da referida instituição.

O TEMPO ESTIMADO DE RESPOSTA é de, aproximadamente, 10 MINUTOS. As respostas serão tratadas de forma confidencial, sem identificar os respondentes. O trabalho final será poderá ser publicado em revista científica. Todavia destaca-se que haverá anonimato dos participantes da pesquisa.

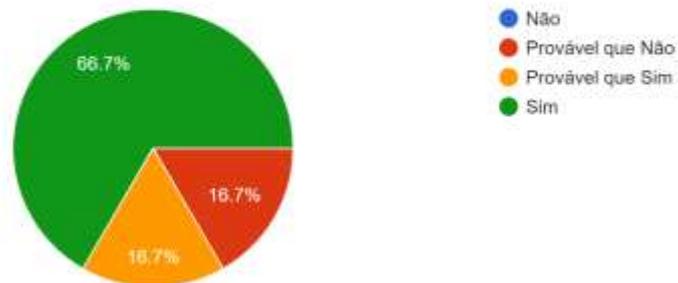
A participação é livre e voluntária, cabendo destacar que os riscos envolvidos em sua participação são mínimos (cansaço e disponibilidade de tempo) e também não haverá remuneração para os respondentes. O benefício desse trabalho consiste na proposição de uma METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE SUSTENTABILIDADE DE PRODUTOS EM PROCESSOS DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS E TECNOLOGIAS.

Ao responde-lo, afirmo que estou ciente que as informações aqui fornecida não serão divulgadas individualmente, de forma que a identidade dos entrevistados serão preservados e concordo em participar desse estudo.

Se necessitar esclarecimentos adicionais, esteja à vontade para contatar-me pelo e-mail [andreolive01@gmail.com](mailto:andreolive01@gmail.com) ou [andre.soliveira@fieb.org.br](mailto:andre.soliveira@fieb.org.br) ou telefone (71) 98802 9600.

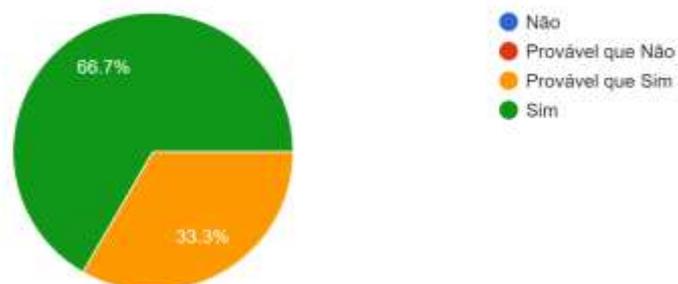
1. FERRO FUNDIDO - Capacidade de Estruturação - O setor ou a empresa tem acesso a Financiamento (próprio ou 3º)?

6 responses



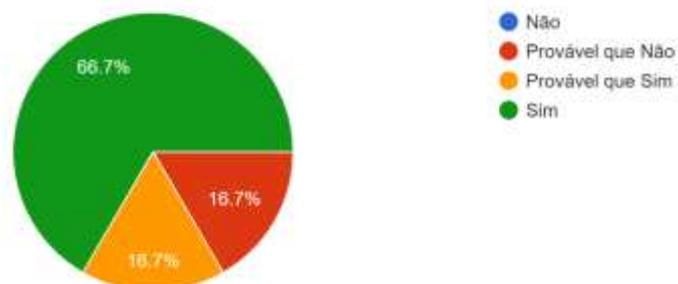
2. CONCRETO POLMÉRICO - Capacidade de Estruturação - O setor ou a empresa tem acesso a Financiamento (próprio ou 3º)?

6 responses



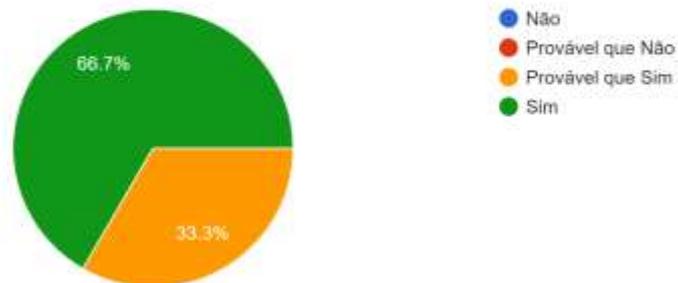
3. FERRO FUNDIDO - Capacidade de Estruturação - O setor ou a empresa tem acesso a MÃO DE OBRA ?

6 responses



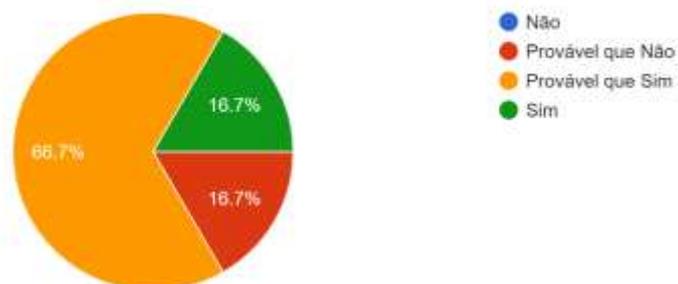
#### 4. CONCRETO POLIMÉRICO - Capacidade de Estruturação - O setor ou a empresa tem acesso a MÃO DE OBRA ?

6 responses



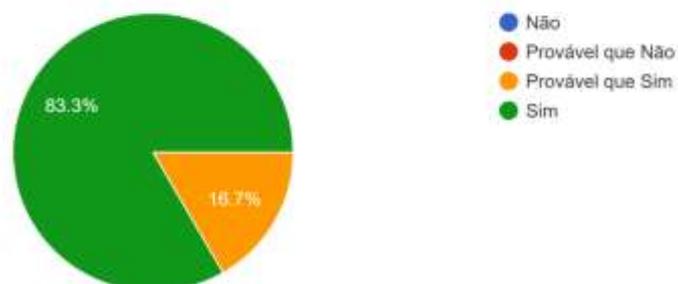
#### 5. Vale tanto para o FERRO FUNDIDO quanto para o CONCRETO POLIMÉRICO - A concorrência tem vantagem competitiva?

6 responses



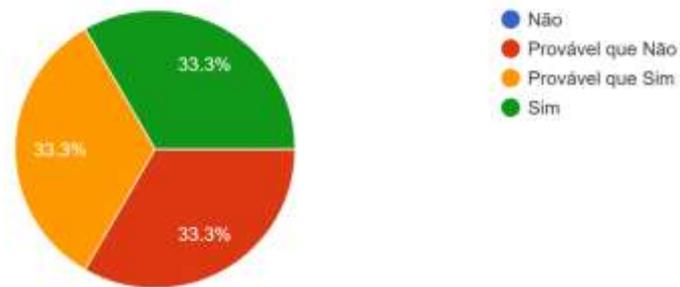
#### 6. FERRO FUNDIDO - Existem tecnologias sendo desenvolvidas que podem substituí-lo?

6 responses

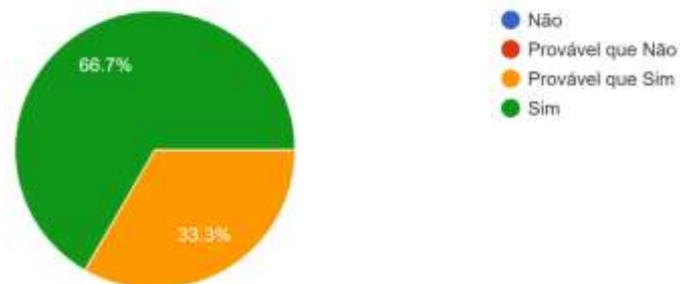


**7. CONCRETO POLIMÉRICO - Existem tecnologias sendo desenvolvidas que podem substituí-lo?**

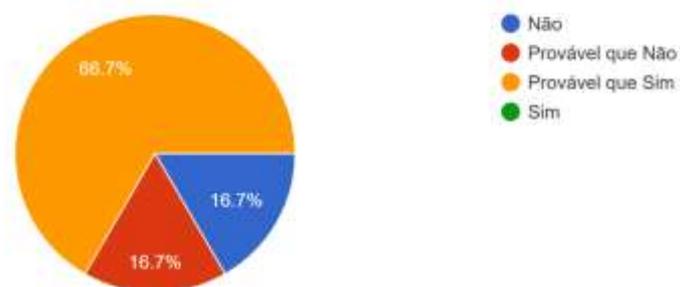
6 responses:

**8. FERRO FUNDIDO - É um produto fácil de imitar?**

6 responses:

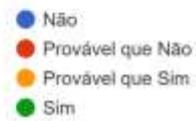
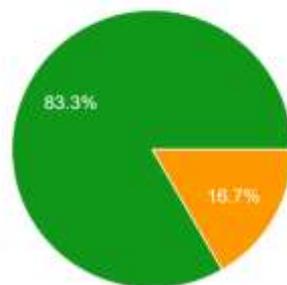
**9. CONCRETO POLIMÉRICO - É um produto fácil de imitar?**

6 responses:



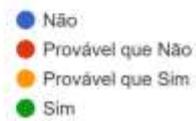
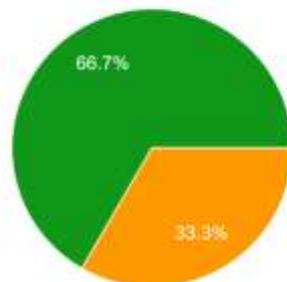
## 10. FERRO FUNDIDO - Tem acesso aos clientes?

6 responses:



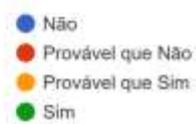
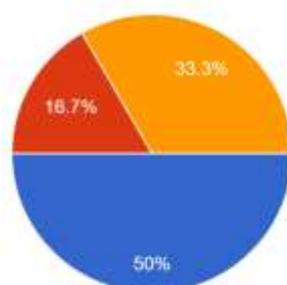
## 11. CONCRETO POLIMÉRICO - Tem acesso aos clientes?

6 responses:



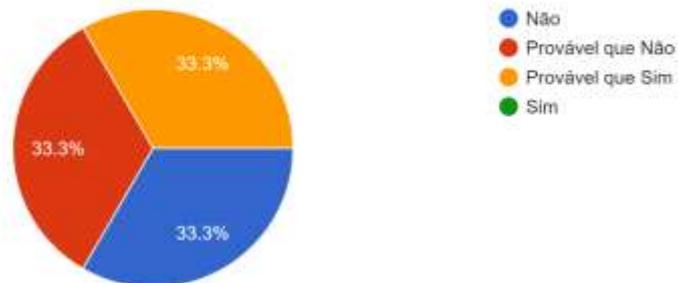
## 12. São poucos clientes?

6 responses:



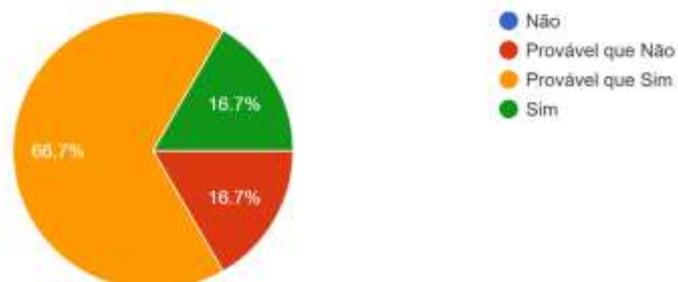
13. Vale tanto para o FERRO FUNDIDO quanto para o CONCRETO POLIMÉRICO - A regulamentação ou normas dificulta o acesso ao mercado?

6 responses



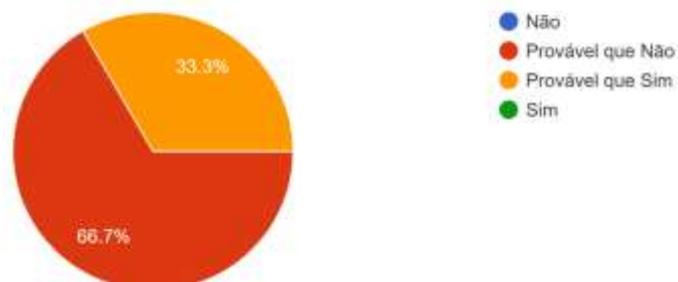
14. FERRO FUNDIDO - É necessário muito capital para entrar no mercado?

6 responses



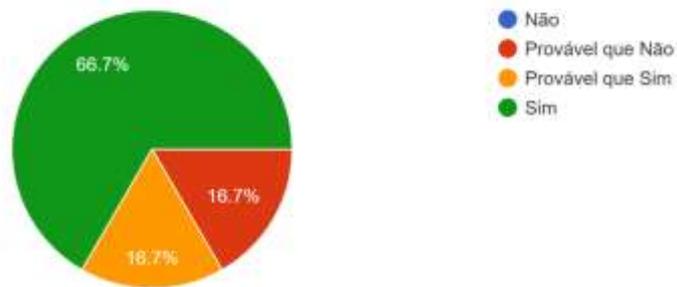
15. CONCRETO POLIMÉRICO - É necessário muito capital para entrar no mercado?

6 responses



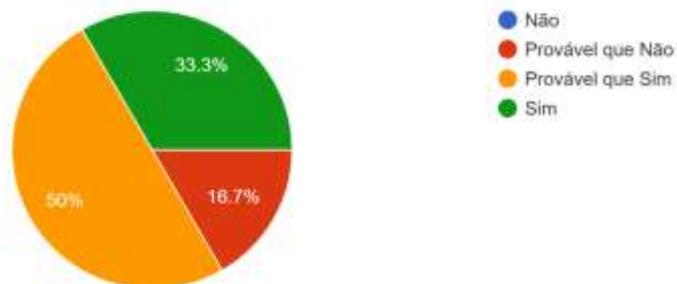
## 16. FERRO FUNDIDO - O mercado tem muitos fornecedores de insumos?

6 responses:



## 17. CONCRETO POLIMÉRICO - O mercado tem muitos fornecedores de insumos?

6 responses:



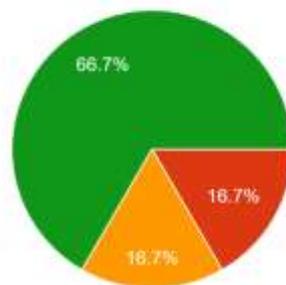
## 18. FERRO FUNDIDO - É fácil ter acesso aos fornecedores?

6 responses:



## 19. CONCRETO POLIMÉRICO - É fácil ter acesso aos fornecedores?

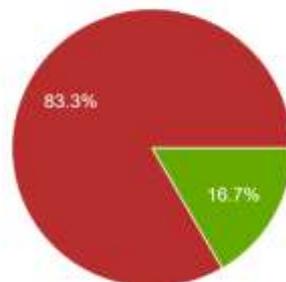
6 responses:



- Não
- Provável que Não
- Provável que Sim
- Sim

## 20. FERRO FUNDIDO - Qual é o TRL do produto?

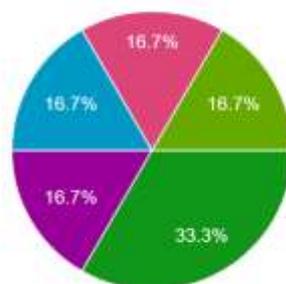
6 responses:



- TRL 1 - Princípios de base observados e relatados
- TRL 2 - Conceito e/ou aplicação da te...
- TRL 3 - Prova de conceito analítica e...
- TRL 4 - Verificação funcional em ambi...
- TRL 5 - Verificação em ambiente relev...
- TRL 6 - Modelo demonstrando as funç...
- TRL 7 - Modelo demonstrando o dese...
- TRL 8 - Sistema real desenvolvido e a...
- TRL 9 - Sistema real demonstrado por...

## 21. CONCRETO POLIMÉRICO - Qual é o TRL do produto?

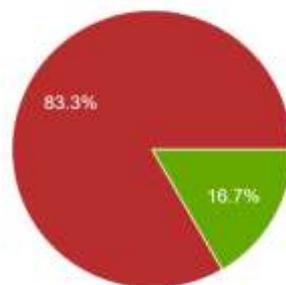
6 responses:



- TRL 1 - Princípios de base observados e relatados
  - TRL 2 - Conceito e/ou aplicação da te...
  - TRL 3 - Prova de conceito analítica e...
  - TRL 4 - Verificação funcional em ambi...
  - TRL 5 - Verificação em ambiente relev...
  - TRL 6 - Modelo demonstrando as funç...
  - TRL 7 - Modelo demonstrando o dese...
  - TRL 8 - Sistema real desenvolvido e a...
  - TRL 9 - Sistema real demonstrado por...
-

## 22. FERRO FUNDIDO - Qual é o MRL do produto?

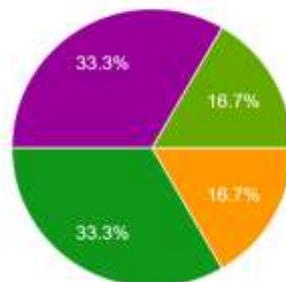
6 responses:



- MRL 1 - Proposta do conceito com validação científica
- MRL 2 - Aplicação e validação do con...
- MRL 3 - Prova experimental do concel...
- MRL 4 - Produto validado em ambient...
- MRL 5 - Capacidades básicas demon...
- MRL 6 - Processo otimizado para taxa...
- MRL 7 - Capacidade e taxa de produç...
- MRL 8 - Processo de produção compl...
- MRL 9 - Processo de produção compl...

## 23. CONCRETO POLIMÉRICO - Qual é o MRL do produto?

6 responses:



- MRL 1 - Proposta do conceito com validação científica
- MRL 2 - Aplicação e validação do con...
- MRL 3 - Prova experimental do concel...
- MRL 4 - Produto validado em ambient...
- MRL 5 - Capacidades básicas demon...
- MRL 6 - Processo otimizado para taxa...
- MRL 7 - Capacidade e taxa de produç...
- MRL 8 - Processo de produção compl...
- MRL 9 - Processo de produção compl...

## D. ALGORITMO PARA ESTIMAR A CONFIABILIDADE

```

### Modelo para Estimar a Confiabilidade - Concreto Polimérico e Ferro Fundido -
# computes TTT plot and Barlow-Proschan's test de hipótese (se função é constante) for
censored and uncensored data set
install.packages("fitdistrplus")
library(fitdistrplus)
TTTplot <- function(time,cens=NULL)
{
  n <- length(time)
  oo <- order(time)
  if(is.null(cens)) cens = rep(1,n)
  sorttime <- time[oo]
  sortcens <- cens[oo]
  ttt <- numeric(n)
  ttt[1] <- n*sorttime[1]
  for(i in 2:n)
  {
    ttt[i] <- ttt[i-1]+(n-i+1)*(sorttime[i]-sorttime[i-1])
  }
  ttt <- data.frame(time=sorttime,cens = sortcens,
                    rank=1:n,"cum total time"=ttt)
  colnames(ttt) <- c("time","cens","rank","Cum.Total.Time")#, "i/n", "TTT")
  TTT <- ttt[ttt$cens==1,]
  nfail <- dim(TTT)[1]
  TTT <- cbind(TTT[,-3],TTT$Cum.Total.Time/TTT$Cum.Total.Time[nfail],
              (1:nfail)/nfail)
  colnames(TTT) <- c("time","cens","Cum.Total.Time","TTT","i/n")

  W <- sum(TTT$Cum.Total.Time[1:(nfail-1)])/TTT$Cum.Total.Time[nfail]
  Z <- (W-(nfail-1)/2)/sqrt((nfail-1)/12)
  print(TTT)
  cat("Barlow-Proschan's test\n")
  cat(paste("W=",round(W,4)," k=",nfail,"\n",sep=""))
  cat(paste("Z=",round(Z,4)," p.value=",round(pnorm(-abs(Z)),4),"\n",sep=""))

  plot(TTT$i/n,TTT$TTT,xlab="i/n",ylab="TTT",xlim=c(0,1),
       ylim=c(0,1),pch=19, main="TTT plot (b)",sub=paste("N. failure = ",nfail," N. censored = ", n-
nfail,sep=""))
  lines(c(0,1),c(0,1),lty=1)
  # return(list(TTT=TTT,W=W,Z=Z))
}

##### Datasets: 1- Ferro Fundido; 2 - Concreto Polimérico #####
t1 <- c(6.6333, 5.9833, 5.2667, 7.0500, 7.0167, 7.0667, 7.4333) # CP 1-7
t2 <- c(19.550, 9.7500, 25.800, 4.6500, 3.0167, 2.5333, 14.750, 7.6500) # CP 1-3, 5-7, 9-10

### TTT plots:
TTTplot(t1)
# time cens Cum.Total.Time TTT i/n
# 1 5.2667 1 36.8669 0.7936900 0.1428571
# 2 5.9833 1 41.1665 0.8862540 0.2857143
# 3 6.6333 1 44.4165 0.9562217 0.4285714
# 4 7.0167 1 45.9501 0.9892379 0.5714286
# 5 7.0500 1 46.0500 0.9913886 0.7142857
# 6 7.0667 1 46.0834 0.9921076 0.8571429
# 7 7.4333 1 46.4500 1.0000000 1.0000000
# Barlow-Proschan's test

```

# W=5.6089 k=7  
 # Z=3.6895 p.value=1e-04 = acima da reta diagonal => função crescente. => weibull é mais abrangente e mais flexibilidade.

TTTplot(t2)

#	time	cens	Cum.Total.Time	TTT	i/n
# 1	2.5333	1	20.2664	0.2310878	0.125
# 2	3.0167	1	23.6502	0.2696716	0.250
# 3	4.6500	1	33.4500	0.3814139	0.375
# 4	7.6500	1	48.4500	0.5524515	0.500
# 5	9.7500	1	56.8500	0.6482326	0.625
# 6	14.7500	1	71.8500	0.8192702	0.750
# 7	19.5500	1	81.4500	0.9287343	0.875
# 8	25.8000	1	87.7000	1.0000000	1.000

# Barlow-Proschan's test

# W=3.8309 k=8

# Z=0.4332 p.value=0.3324 => risco constante exponencial atende.

### Ajustes:

require(fitdistrplus)

fw1 <- fitdist(t1, "weibull")

summary(fw1)

# Fitting of the distribution ' weibull ' by maximum likelihood

# Parameters :

# estimate Std. Error

# shape 13.175779 4.259523 # alpha método número

# scale 6.928343 0.207579 ## se for próximo a 1 o exponencial atenderia. # beta

# Loglikelihood: -6.690566 AIC: 17.38113 BIC: 17.27295 ## log verossemelhança # estimador de verossemelhança.

## Quando menor AIC E BIC melhor o modelo quando comparado

### dá ideia da plausibilidade seguindo o modelo. procedimento de ESTIMAÇÃO.Pode apresentar vies para pequenas amostras

# Correlation matrix:

# shape scale

# shape 1.0000000 0.2883719

# scale 0.2883719 1.0000000

fln1 <- fitdist(t1, "lnorm") ..... # pior do que o modelo Weibull

summary(fln1)

# Fitting of the distribution ' lnorm ' by maximum likelihood

# Parameters :

# estimate Std. Error

# meanlog 1.8864518 0.04225166

# sdlog 0.1117874 0.02986568

# Loglikelihood: -7.799637 AIC: 19.59927 BIC: 19.49109 # pior do que o weibull acima.

# Correlation matrix:

# meanlog sdlog

# meanlog 1.000000e+00 -1.400962e-13

# sdlog -1.400962e-13 1.000000e+00

fe2 <- fitdist(t2, "exp")

summary(fe2)

# Fitting of the distribution ' exp ' by maximum likelihood

# Parameters :

# estimate Std. Error

# rate 0.09122007 0.03224729

# Loglikelihood: -27.15584 AIC: 56.31169 BIC: 56.39113 ##### melhor do que o weibull neste caso (concreto polimérico)

fw2 <- fitdist(t2, "weibull") ..... # pior do que o modelo exponencial

summary(fw2)

```

# Fitting of the distribution ' weibull ' by maximum likelihood
# Parameters :
#   estimate Std. Error
# shape 1.429811 0.3996203
# scale 12.119359 3.1692484
# Loglikelihood: -26.45638 AIC: 56.91277 BIC: 57.07165
# Correlation matrix: ### NÃO EXISTE INFLUÊNCIA NA DECISÃO.
#   shape scale
# shape 1.0000000 0.3252411
# scale 0.3252411 1.0000000

#bw1.par <- bootdist(fw1, niter=1000)
#summary(bw1.par)
#Clcdfplot(bw1.par, Cl.level=0.95, Cl.output="probability", Cl.fill = "lightblue", Cl.col = "red")

#bw1.nonpar <- bootdist(fw1, bootmethod="nonparam", niter=1000)
#summary(bw1.nonpar)
#Clcdfplot(bw1.nonpar, Cl.level=0.95, Cl.output="probability", Cl.fill = "lightblue", Cl.col = "red")

#be2.par <- bootdist(fe2, niter=1000)
#summary(be2.par)
#Clcdfplot(be2.par, Cl.level=0.95, Cl.output="probability", Cl.fill = "lightblue", Cl.col = "red")

#be2.nonpar <- bootdist(fe2, bootmethod="nonparam", niter=1000)
#summary(be2.nonpar)
#Clcdfplot(be2.nonpar, Cl.level=0.95, Cl.output="probability", Cl.fill = "lightblue", Cl.col = "red")

#gofstat(fw1)
#gofstat(fw1)$kstest
#gofstat(fw1)$cvmtest
#gofstat(fw1)$adtest

#gofstat(fe2)
#gofstat(fe2)$kstest
#gofstat(fe2)$cvmtest
#gofstat(fe2)$adtest

#cdfcomp(list(fw1, fln1), horizontals = FALSE)
#cdfcomp(list(fe2, fw2), horizontals = FALSE)

### ESTIMADOR LIMITE PRODUTO. ESTIMATIVA NÃO PARAMÉTRICA DA FUNÇÃO
CONFIABILIDADE.

### Curvas de Kaplan-Meier + funções de sobreviv. estimadas: DEGRAU!!!
cens1 <- rep(1, length(t1)) # REPLICAR de acordo com o tamanho do vetor.
cens2 <- rep(1, length(t2))

library(survival) ### FUNÇÃO SURVIT ->
#par(mfrow=c(1,2))
#plot(survfit(Surv(t1,cens1)~1, conf.type="none"), main="FF", xlab="t", ylab="S(t)")
#plot(survfit(Surv(t2,cens2)~1, conf.type="none"), main="CP", xlab="t", ylab="S(t)")

t <- c(t1,t2)
cens <- c(cens1, cens2)
tipo <- c(rep(1, length(t1)), rep(2, length(t2)))

ekm <- survfit(Surv(t,cens)~tipo, conf.type="plain") # estimador kaplan-meier. tipo de intervalo de
confiança PLAIN.
ekm
# Call: survfit(formula = Surv(t, cens) ~ tipo, conf.type = "plain")
#

```

```

#      n events median 0.95LCL 0.95UCL
# tipo=1 7      7 7.02  5.98  7.07
# tipo=2 8      8 8.70  3.02 19.55
summary(ekm)
#Call: survfit(formula = Surv(t, cens) ~ tipo, conf.type = "plain")
#
#      tipo=1
# time n.risk n.event survival std.err lower 95% CI upper 95% CI
# 5.27  7     1  0.857  0.132   0.598   1.000
# 5.98  6     1  0.714  0.171   0.380   1.000
# 6.63  5     1  0.571  0.187   0.205   0.938
# 7.02  4     1  0.429  0.187   0.062   0.795
# 7.05  3     1  0.286  0.171   0.000   0.620
# 7.07  2     1  0.143  0.132   0.000   0.402
# 7.43  1     1  0.000  NaN     NaN     NaN
#      tipo=2
# time n.risk n.event survival std.err lower 95% CI upper 95% CI
# 2.53  8     1  0.875  0.117   0.6458  1.000
# 3.02  7     1  0.750  0.153   0.4499  1.000
# 4.65  6     1  0.625  0.171   0.2895  0.960
# 7.65  5     1  0.500  0.177   0.1535  0.846
# 9.75  4     1  0.375  0.171   0.0395  0.710
# 14.75 3     1  0.250  0.153   0.0000  0.550
# 19.55 2     1  0.125  0.117   0.0000  0.354
# 25.80 1     1  0.000  NaN     NaN     NaN
par(mfrow=c(1,1))
plot(ekm,lty=c(1,1),lwd=c(2,2),col=c(2,4),main="Curvas de Sobrevivência",
conf.int=F,mark.time=T,xlab="Tempo (segundos)",ylab="Função de Sobrevivência
Estimada",pch=1)
legend(20,0.95, lty=c(1,1),col=c(2,4),c("FF","CP"),lwd=2, bty="n") # curva degrau.
#survdiff(Surv(t,cens)~tipo,rho=0)..... #Teste de Log-Rank

#dW=function(param,y){
# alpha=param[1]
# beta=param[2]
# (alpha/beta)*((y/beta)^(alpha-1))*exp(-(y/beta)^alpha)
#}
# função de sobrevivência
SW=function(param,y){
  alpha=param[1]
  beta=param[2]
  exp(-(y/beta)^alpha)
}
# função de risco
hW=function(param,y){
  alpha=param[1]
  beta=param[2]
  (alpha/beta)*((y/beta)^(alpha-1))
}

#logveroW=function(param,y,c){
# soma1=sum(c*log(dW(param,y)))
# soma2=sum((1-c)*log(SW(param,y)))
# soma1+soma2
#}

# t1
#fit1W=optim(c(10,7), fn=logveroW, y=t1, c=cens1, method="BFGS", hessian=TRUE, control =
list(fnscale=-1, maxit=100000))
#fit1W
#covari1W=solve(-fit1W$hessian)

```

```

#vari1W=diag(covari1W); se.est1W=sqrt(vari1W)

#dE=function(param,y){
# lambda=param[1]
# lambda*exp(-lambda*y)
#}
## idem para a exponencial
SE=function(param,y){
  lambda=param[1]
  exp(-lambda*y)
}

hE=function(param,y){
  lambda=param[1]
  rep(lambda, length(y))
}
#t2
#lambda2.est=1/mean(t2)
#lambda2.est

y1=seq(0.01, 25.8, 0.01) # tempo de inicial, final e espaçamento
Sy1=SW(fw1$estimate,y1) # extrai somente as estimativas
points(y1, Sy1, type="l", lty=2, lwd=2, col=2) # sobrepõe ao gráfico anterior

# Sobrevicência em determinado momento. probabilidade de não falhar até o tempo 5 (conversar
com especialista).
# estimar qual seria a força na prática.
SW(fw1$estimate,5)
SE(fe2$estimate,5)

y2=seq(0.01, 25.8, 0.01)
Sy2=SE(fe2$estimate,y2)
points(y2, Sy2, type="l", lty=2, lwd=2, col=4) # GRAFICAMENTE A GENTE VERIFICA QUE OS
MODELOS SÃO ADERENTES.CURVAS DE CONFIABILIDADE DE FF É MELHOR
# DEPOIS O CP MELHORA.

#### 3. RESULTADOS -
#### Testes de aderência (Goodness-of-Fit):
ks.test(t1, "pweibull", fw1$estimate[1], fw1$estimate[2]) # AMOSTRA, WEILBULL, PARÂMETRO
XXX E ESCALA
# One-sample Kolmogorov-Smirnov test
# data: t1
# D = 0.26468, p-value = 0.6198 (SIGNIFICA NÃO REJEIÇÃO DA HITÓTESE). OFERECE BOM
AJUSTE DOS DADOS.
# alternative hypothesis: two-sided
ks.test(t2, "pexp", fe2$estimate)
# One-sample Kolmogorov-Smirnov test
# data: t2
# D = 0.20633, p-value = 0.8217 # IDEM MODLO EXPONENCIAL SÃO APROPRIADOS.
# alternative hypothesis: two-sided

#### Curvas de Risco ESTIMADAS.
y1=seq(0.01, 10, 0.01)
hy1=hW(fw1$estimate,y1)
plot(y1, hy1, type="l", lty=2, lwd=2, col=2, main="Curvas de Taxa de Falha", xlab="Tempo
(segundos)", ylab="Função de Taxa de Estimada")

y2=seq(0.01, 10, 0.01)
hy2=hE(fe2$estimate,y2)
points(y2, hy2, type="l", lty=1, lwd=2, col=4)
legend(1,150, lty=c(1,1),col=c(2,4),c("FF","CP"),lwd=2, bty="n")

```