



# UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

DOUTORADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

RENATO DE CASTRO VIVAS

Modelo híbrido para avaliação e otimização da performance  
da sustentabilidade organizacional



**SALVADOR**  
**2019**

RENATO DE CASTRO VIVAS

MODELO HÍBRIDO PARA AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA PERFORMANCE DA  
SUSTENTABILIDADE ORGANIZACIONAL

Trabalho apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Industrial pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia.

Orientador: Prof<sup>a</sup> Karla Patrícia Santos O. R. Esquerre, DSc

Coorientador: Francisco Gaudêncio Mendonça Freires, DSc

SALVADOR

2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

de Castro Vivas, Renato

Modelo híbrido para avaliação e otimização da  
performance da sustentabilidade organizacional /  
Renato de Castro Vivas. -- Salvador, 2019.  
138 f. : il

Orientadora: Karla Patrícia Santos O. R. Esquerre.  
Coorientador: Francisco Gaudêncio Mendonça  
Freires.

Tese (Doutorado - Engenharia Industrial) --  
Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica,  
2019.

1. Performance da Sustentabilidade. 2. PROMETHEE.  
3. MCDA. 4. Programação de Metas. 5. Multicritério. I.  
Santos O. R. Esquerre, Karla Patrícia. II. Mendonça  
Freires, Francisco Gaudêncio . III. Título.

**“MODELO HÍBRIDO PARA AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA PERFORMANCE  
DA SUSTENTABILIDADE ORGANIZACIONAL”.**

**RENATO DE CASTRO VIVAS**

Tese submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de doutor em Engenharia Industrial.

Examinada por:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Karla Patrícia Santos O. R. Esquerre Karla Patrícia Santos O. R. Esquerre  
Doutora em Engenharia Química, pela Universidade de Campinas, BRASIL, 2003.

Prof. Dr. Ângelo Márcio Oliveira Sant`anna Ângelo Márcio Oliveira Sant`anna  
Doutor em Engenharia de Produção, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, BRASIL, 2009.

Prof. Dr. Adonias Magdiel Silva Ferreira Adonias M. S. Ferreira  
Doutor em Engenharia Industrial, pela Universidade Federal da Bahia, BRASIL, 2015.

Prof. Dr. Diego de Castro Fettermann Diego de Castro Fettermann  
Doutor em Engenharia de Produção, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, BRASIL, 2013.

Prof. Dr. Eduardo Oliveira Teles Eduardo Oliveira Teles  
Doutor em Engenharia Industrial, pela Universidade Federal da Bahia, BRASIL, 2016.

Salvador, BA - BRASIL  
Novembro/2019

## **AGRADECIMENTOS**

Os agradecimentos principais são direcionados à Francisco Gaudêncio, Karla Esquerre, Ângelo Sant'Anna, a minha esposa Priscila Espinheira e todos aqueles que contribuíram para que o desenvolvimento desta tese fosse possível.

## RESUMO

A sustentabilidade consolida-se como um fator competitivo para as organizações onde os estudos sobre a avaliação e otimização da sustentabilidade é requisito fundamental no gerenciamento das organizações em toda sua cadeia de suprimentos. Em uma perspectiva mais específica percebe-se uma lacuna em relação aos modelos de avaliação e otimização da performance da sustentabilidade. Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo para avaliação e otimização da sustentabilidade organizacional. Esta tese foi elaborada em formato de coletânea de artigos. O primeiro artigo é um estudo que está baseado em uma revisão sistemática, envolvendo os trabalhos mais renomados e proeminentes da comunidade científica, bem como uma análise das abordagens quantitativas para avaliação e otimização da sustentabilidade organizacional. O segundo artigo é uma análise comparativa dos modelos multi-atributos de tomada de decisão *The Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations* (PROMETHE), *Vlse Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje* (VIKOR) e *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), o objetivo é identificação do método de ranqueamento mais adequado para o desenvolvimento do modelo. O terceiro artigo é a combinação do modelo multicritério de avaliação, o PROMETHEE, com modelo multiobjetivo de otimização. O quarto artigo é a segunda combinação do modelo multiatributo PROMETHEE com modelo multiobjetivo de programação de metas com priorização para avaliação e otimização do desempenho da sustentabilidade organizacional. O segundo, terceiro e quarto artigos são aplicações experimentais em estudo de caso. Como resultados foram obtidos um ranqueamento da sustentabilidade organizacional através dos anos combinando com modelos de otimização para subsidiar a tomada de decisão. A contribuição deste trabalho é a estrutura de um modelo híbrido aplicado e validado que pode ser facilmente replicado em outras empresas na medida que os resultados norteiam a tomada de decisão para a sustentabilidade organizacional.

**Palavras-chaves:** Performance da Sustentabilidade, MCDA, PROMETHEE, Programação de Metas, PCA, Regressão Múltipla

## ABSTRACT

Sustainability has become a competitive factor for organizations where studies on sustainability assessment and optimization are a key requirement in the management of organizations throughout their supply chain. In a more specific perspective there is a gap regarding the models of evaluation and optimization of sustainability performance. Given this context, this thesis aims to develop a model for evaluation and optimization of organizational sustainability. This thesis was elaborated as a collection of articles. The first paper is a study that is based on a systematic review, involving the most renowned and prominent works of the scientific community, as well as an analysis of quantitative approaches to assessment and optimization of organizational sustainability. The second paper is a comparative analysis of the multi-attribute decision making models The Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations (PROMETHEE), Vise Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje (VIKOR) and Technique For Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), the goal is to identify the most appropriate ranking method for model development. The third paper is the combination of the multicriteria evaluation model, PROMETHEE, with multiobjective optimization model. The fourth paper is the second combination of the PROMETHEE multi-attribute model and the multi-objective priority programming model for the evaluation and optimization of organizational sustainability performance. The second, third and fourth articles are experimental case study applications. As a result, a ranking of organizational sustainability was obtained through the years, combining with optimization models to support decision making. The contribution of this work is the structure of an applied and validated hybrid model that can be easily replicated in other companies as the results guide decision making for organizational sustainability.

**Key-words:** Sustainability Performance, MCDA, PROMETHEE, Goal Programming, PCA, Multiple Regression

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Organização da tese. . . . .	20
FIGURA 2 – Quadro resumo da coletânea de artigos. . . . .	23
FIGURA 3 – Proposta de Modelo . . . . .	25
FIGURA 4 – Matriz paritária . . . . .	28
FIGURA 5 – Matriz da AHP . . . . .	38
FIGURA 6 – Abrangência da Revisão . . . . .	40
FIGURA 7 – Procedimentos de Seleção . . . . .	41
FIGURA 8 – Palavras mais proeminentes no título e resumo . . . . .	42
FIGURA 9 – Palavras mais proeminentes dos periódicos . . . . .	42
FIGURA 10 – Publicações nos últimos 10 anos. . . . .	43
FIGURA 11 – Publicações por periódicos . . . . .	44
FIGURA 12 – Autores que mais publicam . . . . .	44
FIGURA 13 – Métodos mais proeminentes . . . . .	45
FIGURA 14 – Abordagens Quantitativas de Avaliação e Otimização . . . . .	49
FIGURA 15 – Estrutura da AHP . . . . .	52
FIGURA 16 – Intensidade . . . . .	53
FIGURA 17 – Adaptabilidade . . . . .	53
FIGURA 18 – Simplicidade . . . . .	54
FIGURA 19 – Acuracidade . . . . .	54
FIGURA 20 – Gráfico Radar . . . . .	55
FIGURA 21 – Escopo do Artigo. . . . .	61
FIGURA 22 – Escopo do Artigo . . . . .	81
FIGURA 23 – Correlação de Pearson . . . . .	91
FIGURA 24 – PCA bi plot . . . . .	92
FIGURA 25 – Previsões estimadas . . . . .	94
FIGURA 26 – Escopo do Artigo . . . . .	100
FIGURA 27 – Proposta do Modelo . . . . .	101
FIGURA 28 – Métricas Seleccionadas . . . . .	106
FIGURA 29 – Gráfico do ranqueamento . . . . .	107
FIGURA 30 – Estrutura da AHP . . . . .	108
FIGURA 31 – Matriz Normalizada da AHP . . . . .	109
FIGURA 32 – Resultados da programação de metas . . . . .	112
FIGURA 33 – Resultados do teste de sensibilidade . . . . .	113



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Principais indexadores da sustentabilidade . . . . .	27
TABELA 2 – Quadro comparativo dos indexadores. . . . .	27
TABELA 3 – Escala Fundamental de Saaty . . . . .	28
TABELA 4 – Índice de consistência randômica. . . . .	29
TABELA 5 – Escala Fundamental de Saaty . . . . .	38
TABELA 6 – Índice de consistência randômica. . . . .	39
TABELA 7 – Artigos de revisão sobre o tema. . . . .	46
TABELA 8 – Abordagens dos artigos selecionados. . . . .	47
TABELA 9 – Avaliação global da AHP . . . . .	55
TABELA 10 – Indicadores selecionados pelo GRI . . . . .	67
TABELA 11 – Parâmetros de Entrada. Parte A . . . . .	68
TABELA 12 – Parâmetros de Entrada. Parte B . . . . .	68
TABELA 13 – Resultados do TOPSIS. Parte A . . . . .	69
TABELA 14 – Resultados do TOPSIS. Parte B . . . . .	69
TABELA 15 – Ranqueamento do TOPSIS . . . . .	70
TABELA 16 – Resultados do VIKOR. Parte A . . . . .	71
TABELA 17 – Resultados do VIKOR. Parte B . . . . .	71
TABELA 18 – Ranqueamento do Vikor . . . . .	72
TABELA 19 – Resultados do PROMETHEE: Parte A . . . . .	73
TABELA 20 – Resultados do PROMETHEE: Parte B . . . . .	73
TABELA 21 – Ranqueamento do PROMETHEE . . . . .	74
TABELA 22 – Comparativos dos ranqueamentos . . . . .	75
TABELA 23 – Indicadores selecionados pelo GRI . . . . .	85
TABELA 24 – Entradas do PROMETHEE . . . . .	86
TABELA 25 – Fluxos individuais e fluxos globais . . . . .	87
TABELA 26 – Teste de Sensibilidade: Quantidade de Indicadores . . . . .	87
TABELA 27 – Teste de Sensibilidade: Pesos das dimensões. . . . .	88
TABELA 28 – Fluxos individuais: Parte A . . . . .	90
TABELA 29 – Fluxos Individuais: Parte B . . . . .	90
TABELA 30 – Principal Componentes . . . . .	92
TABELA 31 – Regressão Linear Múltipla . . . . .	93
TABELA 32 – Regressão Linear Múltipla . . . . .	95
TABELA 33 – Principais indexadores da sustentabilidade . . . . .	102
TABELA 34 – Entradas do PROMETHEE . . . . .	106
TABELA 35 – Ranqueamento da performance . . . . .	107

TABELA 36 – Variáveis do modelo . . . . .	109
TABELA 37 – Priorização das metas . . . . .	112

## LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

**AGRA** Areal Grey Relational Analysis

**AHP** Análise Hierárquica dos Processos

**ANP** Analytical Network Process

**ARAS** Additive Ratio ASsessment

**BSC** Balanced ScoreCard

**CNUMAD** Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento

**COPRAS** Complex Proportional Assessment

**DEA** Data Envelopment Analysis

**DEMATEL** Decision making trial and evaluation laboratory

**ELECTRE** ELimination and Choice Expressing REality

**GRA** Grey Relational Analysis

**MAUT** Multi-Attribute Utility Theory

**MAVT** Multipleattribute value theory

**MCDA** Multiple criteria decision analysis

**MCDM** Multiple criteria decision making

**MILP** Mixed integer linear programming

**MIVES** Modelo integrado de valor para evaluaciones sostenibles

**MODM** Multi-Objetive Decision Making

**PCA** Principal Component Analysis

**PL** Programação Linear

**PROMETHE** The Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations

**QFD** Quality function deployment

**SOWIA** Subjective and Objective Weight Integrated Approach

**SWARA** Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis

**StArt** State of the Art through Systematic Review

**TOPSIS** Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

**Vikor** Vlse Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	CONTEXTO INTRODUTÓRIO	14
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA	15
1.3	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	16
1.4	RELEVÂNCIA E CONTRIBUIÇÃO	17
1.5	VIABILIDADE E ADERÊNCIA DOS MÉTODOS AOS OBJETIVOS PROPOSTOS	19
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>20</b>
2.1	ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO	20
2.2	DELINEAMENTO METODOLÓGICO	21
2.3	ESTRUTURA DA TESE	23
2.4	MODELO PROPOSTO	24
<b>3</b>	<b>COLETÂNEA DE ARTIGOS</b>	<b>34</b>
3.1	ARTIGO 01 - ESTADO DA ARTE	34
3.2	ARTIGO 02 - ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS	57
3.3	ARTIGO 03 - PRIMEIRA APLICAÇÃO DO MODELO HÍBRIDO	77
3.4	ARTIGO 04 - SEGUNDA APLICAÇÃO DO MODELO HÍBRIDO	97
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>115</b>
4.1	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	116
4.2	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	118
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>119</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO INTRODUTÓRIO

Os últimos anos têm sido marcados por profundas revoluções, principalmente nos padrões de desenvolvimento dos países capitalistas, desenvolvidos e emergentes, com influências diretas nos modelos de gerenciamento que referenciam as práticas produtivas das organizações. No centro dessas transformações estão as questões da sustentabilidade, referenciado como uma arte adaptativa apegada à ciência a serviço da visão ética. Esta implica que as necessidades atuais não podem sacrificar o futuro bem-estar através do equilíbrio entre o meio ambiente, saúde, bem-estar econômico, inclusão social e criatividade cultural (FARLEY; SMITH, 2013).

Com o advento das questões ambientais os olhos da sociedade e das organizações tem se focado cada vez mais nos aspectos que levam a sustentabilidade dos sistemas, principalmente na manufatura e na gestão da cadeia de suprimentos dos setores que geram impactos ambientais, sociais e econômicos na sociedade. Com a incorporação da sustentabilidade na cadeia de suprimentos têm-se as cadeias verdes ou sustentáveis, a inserção da sustentabilidade auxilia as organizações a obterem vantagens competitivas, benefícios econômicos e melhorias de imagem da marca (SEURING; MÜLLER, 2008).

Os esforços na avaliação da sustentabilidade sobre o desempenho dos negócios têm atraído a atenção desde a década 80 (GOLICIC; SMITH, 2013). A busca por métodos de avaliação da sustentabilidade foi identificada na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD) no Rio de Janeiro em 1992. No qual a ênfase maior foi na necessidade do desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade para auxiliar os países, comunidades e empresas na sua tomada de decisões (GRI, 2018).

Modelos conceituais de avaliação da sustentabilidade ajudam a concentrar e esclarecer o que medir, o que esperar da medição e que tipos de indicadores podem ser usados. A diversidade de parâmetros e variáveis fundamentais resulta em teorias, desenvolvimento de indicadores e modelos diferentes. As principais diferenças entre eles são as maneiras pelas quais eles conceituam as principais dimensões do desenvolvimento sustentável, as inter-relações entre essas dimensões, a forma como o grupo de questões é medida e os conceitos pelos quais eles justificam a seleção e agregação destes indicadores (LABUSCHAGNE; BRENT, 2008).

A sustentabilidade tem crescido em destaque tanto para os pesquisadores da gestão da cadeia de suprimentos como para as organizações. Devido à regulamenta-

ção mais rígida e ao aumento da consciência ambiental e social dos consumidores e da comunidade, as organizações precisam incorporar parâmetros ambientais e sociais em suas práticas de cadeia de suprimentos (GOLD; SEURING; BESKE, 2009). Embora os avanços na prática e na teoria tenham contribuído para sustentabilidade, o tema está longe de se tornar maduro (KIRCHOFF; OMAR; FUGATE, 2016). Segundo Brandenburg, Govindan et al. (2014) o campo de modelagem sustentável está em ascensão na comunidade científica, isto significa que mais pesquisas baseadas na modelagem da sustentabilidade precisam ser realizadas para o entendimento da integração da sustentabilidade nas organizações.

## 1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

A situação-problema desta pesquisa foi direcionada a partir de uma revisão preliminar da literatura desenvolvida com uma revisão sistemática para compreensão do contexto da pesquisa. Observam-se então muitas lacunas de pesquisa, algumas destas relacionadas abaixo:

a) Existe uma significativa concentração de pesquisas e estudos voltados para o entendimento da sustentabilidade e sua aplicação na medição da performance da sustentabilidade das organizações focadas em estabelecer conceitos e definições sobre os temas, entretanto observa-se poucas pesquisas que busquem o desenvolvimento de modelos quantitativos multicritérios para gestão de organizações sustentáveis, principalmente no setor do petróleo e gás.

b) A maioria das pesquisas voltadas para o desenvolvimento de modelos de gestão da sustentabilidade é subjetiva e de certa forma limitada a poucos parâmetros de análise, não fornecendo a confiabilidade necessária para tomada de decisões. Percebe-se então a insuficiência de modelos de análise e otimização que levem em consideração os importantes parâmetros da sustentabilidade.

c) Mesmo considerando a existência de trabalhos que tratem de modelos de análise da sustentabilidade nas organizações, não é de conhecimento pesquisas que trate de um modelo específico para a avaliação e otimização de forma integrada de organizações do setor do petróleo e gás no Brasil. Assim, não é conhecido o quadro da sustentabilidade e qual a perspectiva de crescimento da performance da sustentabilidade destas organizações.

d) Assim, destaca-se que existe um gap de pesquisa na área de modelos quantitativos com a integração de modelos de análise multicritérios (multi-atributos e multi-objetivos).

## Questões de Pesquisa

As etapas do estudo estão explicitadas de forma detalhada no capítulo 2, porém é importante destacar que as questões de pesquisa relativas às fases qualitativas e quantitativas da investigação, a saber, a coletânea dos artigos, são as seguintes:

Questão Geral: É possível combinar modelos matemáticos e analíticos para auxiliar a tomada de decisões organizacional na avaliação e otimização do desempenho da sustentabilidade?

Q1: Quais abordagens multicritérios mais adequadas para avaliação e otimização da performance da sustentabilidade?

Q2: Quais os métodos mais adequados para tomada de decisão sobre o desempenho da sustentabilidade?

Q3: É possível combinar modelos multicritérios para avaliação e otimização da performance da sustentabilidade das organizações?

Q4: A combinação proposta é adequada para avaliação e otimização da empresa do setor de petróleo e gás?

## Hipóteses de Pesquisa

A formulação da hipótese origina-se do modelo de avaliação e otimização da performance da sustentabilidade desenvolvido na segunda etapa da pesquisa. Assim, propõem-se as seguintes hipóteses:

H0 – Os requisitos do modelo desenvolvido para avaliação e otimização da performance da sustentabilidade das organizações do setor do petróleo e gás baseados nas abordagens dos modelos multicritérios não são aderentes aos princípios de objetividade e equilíbrio do desenvolvimento sustentável e, portanto, não podem orientar e servir de ferramenta para as organizações do setor do petróleo e gás na sua tomada de decisões para a implementação de cadeias de suprimentos sustentáveis.

H1 – Os requisitos do modelo desenvolvido para avaliação e otimização da performance da sustentabilidade das organizações do setor do petróleo e gás baseados nas abordagens dos modelos multicritérios são aderentes aos princípios de objetividade e equilíbrio do desenvolvimento sustentável e, portanto, podem orientar e servir de ferramenta para as organizações do setor do petróleo e gás na sua tomada de decisões para a implementação de cadeias de suprimentos sustentáveis.

## 1.3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um modelo híbrido estruturado integrando modelos multicritérios para tomada de decisões (multi-atributos e



multi-objetivos) para avaliação e otimização da performance da sustentabilidade em organizações do setor de petróleo e gás.

- Elaborar uma revisão sistemática dos modelos multicritérios de avaliação e otimização da sustentabilidade;
- Estudar os métodos multicritérios através de uma análise comparativa e experimentação dos modelos multi-atributos;
- Desenvolver modelo híbrido integrando modelo multi-atributo com modelo multi-objetivo;
- Desenvolver método de avaliação e otimização da performance da sustentabilidade para organizações do setor do petróleo e gás.

#### 1.4 RELEVÂNCIA E CONTRIBUIÇÃO

##### Contexto Social

Os campos de petróleo e gás, ainda que no declínio de sua produção, são fortes elementos de promoção do desenvolvimento econômico e social. A produção dos campos de petróleo e gás tem um impacto positivo sobre o desenvolvimento das regiões abrangentes de toda a cadeia de suprimentos do petróleo e gás. Tais campos de petróleo podem gerar empregos diretos e indiretos, promover a educação, circulação de renda, pagamento de royalties, recolhimento de impostos e desenvolver a cultura local através dos programas sociais. Os modelos de gestão e controle da sustentabilidade podem servir como subsídios para a empresas diminuírem seus impactos sociais negativos, bem como investir no desenvolvimento humano local, regional e nacional.

##### Contexto Econômico

O petróleo e gás são considerados mundialmente como recursos estratégicos, sendo apresentados como fatores de desenvolvimento econômico de muitos países, pela dependência dos seus derivados que são utilizados pela maior parte dos meios de transportes e produtos industrializados. Assim as economias de muitos países são provenientes principalmente da exploração, refino e comercialização destes derivados do petróleo. No Brasil não é diferente, o setor do petróleo e gás tem importante participação no desenvolvimento econômico do país. Os modelos de gestão e controle da sustentabilidade visam também o equilíbrio econômico e é de fundamental importância os estudos dos modelos para avaliação e otimização da performance da sustentabilidade.

## Contexto Ambiental

A questão ambiental também é um ponto que deve ser estudado. As intervenções humanas na natureza causam impactos, principalmente quando se trata de extração de recursos naturais não renováveis. O controle e gestão dos indicadores ambientais podem significar o equilíbrio ambiental, favorecendo a sustentabilidade. Os modelos de avaliação e otimização da performance da sustentabilidade tem por objetivo o equilíbrio das dimensões econômicas, sociais e ambientais. A partir dos resultados obtidos da avaliação pode-se direcionar investimentos pra áreas prioritárias a fim de reestabelecer o equilíbrio da sustentabilidade.

## Contexto Acadêmico/Científico

O desenvolvimento de um modelo híbrido multicritério, específico para avaliação e otimização da sustentabilidade podem auxiliar na tomada de decisões no que diz respeito ao planejamento estratégico da organização. Um estudo sobre modelos de avaliação e otimização da performance da sustentabilidade servirão como orientação de estudos futuros e para outros pesquisadores. Os modelos propostos poderão ser replicados para outras organizações, regiões e setores produtivos.

Um conjunto de contribuições acadêmicas e científicas foram proporcionadas a partir do desenvolvimento deste trabalho.

- A elaboração, apresentação e publicação artigo intitulado "Sustentabilidade da cadeia de suprimentos do petróleo e gás oriundo dos campos maduros"no I Workshop Anual de Avaliação dos PRH ANP/MCTI PRH49, PRH52, PRH55. Em 29 de setembro de 2015.
- A elaboração e apresentação artigo intitulado "*Analysis of supply chain sustainability of oil and gas arising out of mature fields using the modeling, simulation and optimization*"no 2nd International Colloquium: Bioenergy for the future of humanity - United States and Brazil partnership. Em 19 de novembro de 2015.
- A elaboração e apresentação artigo intitulado *Analysis of enhanced oil recovery of mature oil fields and gas: using the analytic hierarchy process* no 27th Annual Conference of the Production and Operations Management Society (POMS), em Orlando, USA, em maio de 2016.
- A elaboração, apresentação e publicação do resumo intitulado "Desenvolvimento de método para avaliação da sustentabilidade na cadeia de suprimentos do petróleo e gás"no II Workshop Anual de Avaliação dos PRH ANP/MCTI PRH49, PRH52, PRH55. Em 01 de novembro de 2016

- A elaboração, submissão, aceite e publicação do artigo intitulado *Integrated method combining analytical and mathematical models for the modelling, evaluation and optimization of sustainable supply chains: A Brazilian case study* no periódico *Computers and Industrial Engineering* com Qualis A1 e fator de impacto 3,518. Em 30 de janeiro de 2019.
- A elaboração, submissão, aceite e publicação do artigo intitulado *Measuring sustainability performance with multi criteria model: a case study* no periódico *Sustainability* com Qualis B1 e fator de impacto 2,592. Em 20 de setembro de 2019.
- A elaboração do artigo intitulado *Multicriteria Models for Sustainability Assessment and Optimization: A Systematic Review* e previsão de submissão no periódico *Journal of Cleaner Production* com Qualis A1 e fator de impacto 6,395. Em novembro de 2019.
- A elaboração do artigo intitulado *Comparative analysis of multi criteria decision making techniques for sustainable performance* e previsão de submissão no periódico *Production* com Qualis B2. Em novembro de 2019.

## 1.5 VIABILIDADE E ADERÊNCIA DOS MÉTODOS AOS OBJETIVOS PROPOSTOS

A revisão sistemática é de suma importância para o entendimento prévio de qualquer pesquisa científica, seja do setor do petróleo ou qualquer outro. O foco desta pesquisa são os trabalhos mais proeminentes da comunidade científica. Sendo estes considerados de forte relevância nas bases científicas. O desenvolvimento do modelo híbrido multicritério (multi-atributo e multi-objetivo) para avaliação da performance da sustentabilidade é algo inovador, pois os modelos existentes propõem soluções subjetivas e incompletas quando se trata de sistemas complexos com abordagem da sustentabilidade. O modelo multicritério de análise da performance apresenta uma comparação organizacional através dos anos. A otimização proposta pelos modelos matemáticos trás a solução ótima e a simulação traz perspectivas futuras de crescimento ou decrescimentos. Assim os resultados trazem importantes subsídios na tomada de decisões a nível organizacional.

## 2 METODOLOGIA

Este capítulo retrata os procedimentos e técnicas metodológicas utilizados na pesquisa científica. Inicialmente é interessante saber o que é uma pesquisa científica. As pesquisas científicas são os resultados de investigações, levantamentos ou observações, realizados com o objetivo de resolver determinado problema ou questão, recorrendo a procedimentos, técnicas e metodologias científicas. Segundo (MARCONI; LAKATOS, 2011) a pesquisa é uma inquirição, um procedimento sistemático e intensivo, que tem como objetivos a descoberta e interpretação de fatos que estão inseridos em casos reais. A pesquisa é a atividade nuclear da ciência. Ela possibilita uma aproximação e um entendimento da realidade a investigar. Processa-se por meio de aproximações sucessivas da realidade, fornecendo-nos subsídios para uma intervenção no real (FONSECA, 2002).

### 2.1 ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO

A organização do estudo está ilustrada na Figura 1. O primeiro capítulo busca tratar da contextualização introdutória da avaliação e otimização da performance da sustentabilidade corporativa como tema central da investigação. Também é apresentado a situação-problema da pesquisa, os objetivos, a relevância e contribuição da pesquisa, viabilidade e aderências dos métodos propostos aos objetivos, as questões e hipóteses.

No segundo capítulo é apresentado o método de pesquisa, onde se pretende delinear os meios que serão utilizados para obtenção dos resultados nas três etapas da investigação, a saber: a metodologia aplicada para o desenvolvimento do modelo de avaliação da sustentabilidade de cadeias de suprimentos. As técnicas utilizadas para

FIGURA 1 – Organização da tese.

1. Introdução	2. Metodologia	3. Desenvolvimento	4. Considerações Finais
Contextualização;  Problema de pesquisa;  Objetivos;  Relevância e Contribuição;  Viabilidade e Aderência.	Delineamento Metodológico;  Estrutura da tese;  Proposta do Modelo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>ARTIGO 01:</b> Revisão sistemática sobre modelos multicritérios para avaliação e otimização da performance sustentabilidade;</li> <li>• <b>ARTIGO 02:</b> Análise comparativa de técnicas de tomada de decisão multicritérios para a performance da sustentabilidade.</li> <li>• <b>ARTIGO 03:</b> Implementação do modelo híbrido de avaliação da sustentabilidade com as técnicas PROMETHEE, PCA E MLR;</li> <li>• <b>ARTIGO 04:</b> Implementação do modelo híbrido de avaliação e otimização da sustentabilidade com as técnicas, PROMETHEE, AHP e Programação de Metas;</li> </ul>	Conclusões;  Limitações da pesquisa;  Contribuições Acadêmicas;  Sugestões para pesquisas futuras.

FONTE: Elaborado pelo autor.

seleção, agregação e ponderação de parâmetros da sustentabilidade no modelo em desenvolvimento.

O terceiro capítulo são apresentados os trabalhos em formato de coletânea de artigos.

O quarto e último capítulo são as considerações finais e conclusões, finalizando a etapa de documentação e registro da tese. Com propostas para futuros trabalhos.

## 2.2 DELINEAMENTO METODOLÓGICO

Nesta seção são apresentadas as premissas delineadas para a metodologia. O delineamento metodológico trata-se então da descrição e explicação das etapas da metodologia (MARCONI; LAKATOS, 2011).

### Tipo de pesquisa

A pesquisa é composta por algumas características dos métodos tradicionais de pesquisa, embora a composição dela seja de diversos tipos. Inicia-se a pesquisa com um estudo exploratório de revisão sistemática para delimitação do problema a ser estudado. Em seguida são analisadas as abordagens e modelos multicritérios para tomada de decisão. Posteriormente é proposto modelo para avaliação e otimização da sustentabilidade organizacional onde através de estudo de caso é validado através da aplicação em uma empresa nacional de petróleo e gás de onde são extraídos informações para melhoria do método proposto inicialmente.

### Quanto à abordagem

A abordagem da pesquisa é quantitativa e qualitativa. Na etapa de coleta de dados para construção do modelo conceitual utiliza-se da abordagem quantitativa. Na etapa de interpretação e inferência dos resultados utiliza-se da abordagem qualitativa.

A pesquisa quantitativa segundo (FONSECA, 2002) se centra na objetividade recorrendo à modelos matemáticos para descrição de causas para um determinado fenômeno e suas relações entre variáveis, parâmetros, recursos, entidades, atributos, dentre outros.

De acordo com (GOLDENBERG, 1997) a pesquisa qualitativa não se preocupa com a linguagem numérica, mas, sim, com o aprofundamento da compreensão de um fato, de uma organização, de atributos associados a determinado fenômeno.

### Quanto à natureza

O estudo tem como característica uma pesquisa aplicada na gestão e controle da sustentabilidade corporativa, com validação e aplicação em uma empresa do setor de petróleo e gás.

Segundo (MARCONI; LAKATOS, 2011) a pesquisa aplicada tem como objetivos a geração de conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos, envolvendo fatos e interesses da sociedade.

Esta pesquisa visa auxiliar na tomada de decisões de organizações a respeito de sua sustentabilidade.

### Quanto aos objetivos

A pesquisa é tipificada em exploratória e descritiva. A primeira etapa da tese é de fase exploratória, onde é proposta uma revisão sistemática sobre os temas relativos ao projeto, como sustentabilidade, indicadores, métodos de avaliação de desempenho, modelos multicritérios para tomada de decisão, petróleo e gás. A pesquisa exploratória Segundo (GIL, 2007) tem por objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses.

As etapas de construção e aplicação dos modelos são de caráter descritivo, onde o estudo através de modelos análise multicritérios tem a pretensão de descrever os fatos e fenômenos da sustentabilidade corporativa. De acordo com (TRIVINOS, 1987) a pesquisa descritiva o pesquisador precisa de uma série de informações sobre o que deseja estudar. Com a pretensão de descrever fatos e fenômenos da realidade.

### Quanto aos procedimentos

Para se desenvolver uma pesquisa é indispensável selecionar no método de pesquisa o procedimento utilizado. O estudo é composto por uma pesquisa exploratória caracterizado pelas investigações da pesquisa bibliográfica e/ou documental, sobre modelos de análise multicritérios para tomada de decisão sobre a sustentabilidade no setor petróleo e gás.

Este trabalho limita-se a atuar com base no seguinte escopo: Conceitualmente a abrangência é na tomada de decisões a respeito dos aspectos econômicos, sociais e ambientais da sustentabilidade. Os modelos estão limitados a utilização de métodos multicritérios de análise como os multi-atributos e multi-objetivos.

O estudo de caso empregado neste trabalho tem um embasamento de coleta de dados secundário, a partir da pesquisa através de especialistas e literatura disponível como artigos, livros, relatórios e documentos derivados de organizações atuantes no setor do petróleo e gás.

FIGURA 2 – Quadro resumo da coletânea de artigos.

Estudos	Objetivos	Questões de pesquisas	Revisão teórica	Método de Pesquisa
ARTIGO 01	Elaborar uma revisão sistemática dos modelos multicritérios de avaliação e otimização da sustentabilidade;	Q <sub>1</sub> : Quais abordagens multicritérios mais adequadas para avaliação e otimização da performance da sustentabilidade?	Abordagens MCDA/MCDM; Abordagens multiatributo; Abordagens multi-objetivo.	Pesquisa de caráter exploratória
ARTIGO 02	Estudar os métodos multicritérios através de uma análise comparativa e experimentação dos modelos multiatributos;	Q <sub>2</sub> : Quais os métodos mais adequados para tomada de decisão sobre o desempenho da sustentabilidade?	PROMETHEE; TOPSIS; VIKOR;	Pesquisa de caráter exploratório e estudo de caso.
ARTIGO 03	Desenvolver modelo híbrido integrando modelo multiatributo com modelo multiobjetivo;	Q <sub>3</sub> : É possível combinar modelos multicritérios para avaliação e otimização da performance da sustentabilidade das organizações?	Combinação ou Hibridização de métodos multicritérios; PROMETHEE; Análise Componentes Principais; Regressão linear múltipla.	Pesquisa de caráter explicativo e estudo de caso.
ARTIGO 04	Desenvolver método de avaliação e otimização da performance da sustentabilidade para organizações do setor do petróleo e gás.	Q <sub>4</sub> : A combinação realizada é adequada para avaliação e otimização da empresa do setor de petróleo e gás?	Combinação ou Hibridização de métodos multicritérios; PROMETHEE; Programação de Metas.	Pesquisa de caráter explicativo e estudo de caso.

FONTE: Elaborado pelo autor.

### Abrangência da pesquisa

De forma geral a abrangência da pesquisa é o estudo dos métodos de avaliação e otimização da sustentabilidade corporativa, sendo aplicado e validado em uma empresa nacional do setor do petróleo e gás. O estudo sobre a sustentabilidade versa sobre as 3 dimensões (social, ambiental e econômico).

### 2.3 ESTRUTURA DA TESE

A estrutura do trabalho está baseada em uma coletânea de artigos, com quatro trabalhos submetidos e/ou publicados em periódicos de referência internacional. O quadro resumo dos trabalhos está ilustrado na Figura 2.

O primeiro artigo trata-se de uma revisão sistemática sobre o tema. Uma pesquisa exploratória sobre os métodos de avaliação e otimização da sustentabilidade no setor do petróleo e gás. A revisão sistemática é desenvolvida, dividindo-se em três partes: O referencial teórico, o estudo bibliométrico e por último o estudo das abordagens das referências. O foco principal da pesquisa exploratória são os modelos multicritérios para tomada de decisão, os modelos multi-atributos e multi-objetivos para avaliação e otimização do desempenho da sustentabilidade em organizações.

O segundo artigo é uma análise comparativa dos métodos de tomada de decisão multi-atributos (PROMETHEE, TOPSIS e VIKOR). Uma experimentação com estudo de caso da empresa do setor do petróleo e gás é realizada a fim de validar os resultados. Também é realizada um estudo das abordagens dos artigos prospectados na revisão sistemática relacionado com os três métodos.

O terceiro artigo é uma aplicação do modelo proposto, ilustrado na Figura 3. A proposta do modelo de avaliação e otimização da sustentabilidade com a combinação das abordagens multicritérios multi atributos e multi objetivos. Esta etapa tem o caráter da pesquisa explicativo com experimentação em estudo de caso. As técnicas PROMETHEE, PCA e MLR são aplicadas nesta etapa.

O quarto artigo é a segunda aplicação do modelo proposto. Esta aplicação se dá por meio da AHP, PROMETHEE e Programação de metas com priorização. Esta pesquisa também tem o caráter explicativo com experimentação em estudo de caso.

## 2.4 MODELO PROPOSTO

Nesta seção se desenvolve a estrutura do modelo proposto que seleciona, prioriza, avalia e otimiza o desempenho da sustentabilidade organizacional. Na Figura 3 estão ilustrados todos as etapas do modelo proposto.

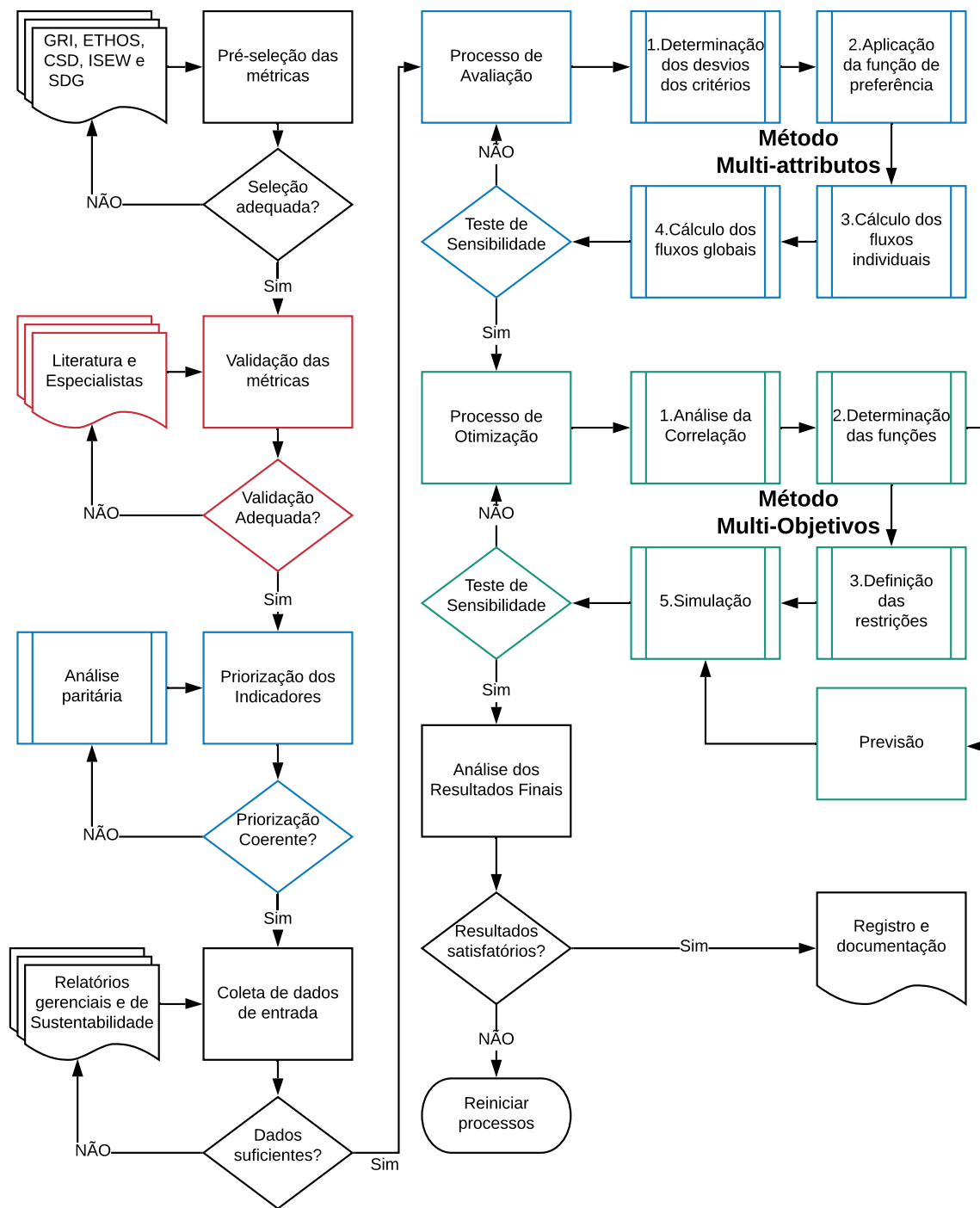
### Pré-seleção de métricas

Um conjunto de métricas está à disposição na literatura científica para utilização na análise da sustentabilidade. Como destacado no estado da arte, existe uma grande quantidade de métricas no que tange o desenvolvimento sustentável. Segundo revisão realizada por (CORY SEARCY, 2015), a quantidade de métricas no aspecto ambiental gira em torno de 1431 indicadores, no aspecto econômico 999 e no aspecto social 760, totalizando 3190 indicadores.

É inviável que um modelo se basei nesta grande quantidade de métricas. Sendo assim, as métricas devem passar por uma pré-seleção. O pesquisador/usuário irá selecionar as métricas mais importantes que poderão ser empregadas em determinado setor.



FIGURA 3 – Proposta de Modelo



FONTE: Elaborado pelo autor.

A composição das métricas podem estar baseadas nos mais diversos indicadores mundiais ou nacionais, como por exemplo, *Global Reporting Initiative (GRI)*, *Commission on Sustainable Development (CSD)*, *Sustainable Economic Welfare Index (ISEW)*, *Sustainable Development, Index (SDI-IBGE)*, *Ethos Institute and Sustainable Development Goals (SDGs)*. A quantidade de indicadores estão ilustradas na Tabela 1 e 2.

### Validação das Métricas

A seleção das métricas precisam ser validadas a fim de dar maior confiabilidade no modelo diminuindo os riscos de uma tomada de decisão qualitativa que por muitas vezes é subjetiva. A validação pode ser realizada através da consulta com especialistas da área através de várias técnicas, dentre elas está o Método Delphi. Ele é baseado no princípio que a escolha ou previsão a respeito de determinado tema é realizado por um grupo estruturado de especialistas. Assim são mais precisas se comparadas às provenientes de grupos não estruturados ou individuais.

Um questionário é enviado aos especialistas, que por sua vez estabelecem uma ordem de importância para as métricas apresentadas. Um survey estruturado com perguntas pode ser elaborado com perguntas relativas a importância de cada dimensão, tema e indicador de sustentabilidade.

### Priorização das métricas

Seguindo as informações estabelecidas pelo grupo de especialistas, esta etapa é necessária para a priorização e ponderação das métricas. Os modelos de decisão multi-critérios tem também esta função. A Análise Hierárquica dos Processos (AHP) é utilizada para coleta e tratamento na priorização e ponderação dos indicadores.

As etapas da Análise Hierárquica dos Processos são estabelecidas da seguinte forma:

- Identificação das alternativas e dos critérios;
- Estabelecer a significância relativa entre os critérios;
- Especificar as preferências para as alternativas;
- Realizar comparação paritária entre os critérios;
- Calcular os valores globais de preferência para cada alternativa.

TABELA 1 – Principais indexadores da sustentabilidade

<b>Indexador</b>	<b>Quantidade</b>
Global Reporting Initiative (GRI)	79
Commission on Sustainable Development (CSD)	96
Index of Sustainable Economic Welfare (ISEW)	20
Sustainable Development Index (SDI-IBGE)	63
Ethos Institute	47
Sustainable Development Goals (SDGs)	17

TABELA 2 – Quadro comparativo dos indexadores.

<b>CSD</b>	<b>GRI</b>	<b>IBGE</b>	<b>SDGs</b>
Pobreza	Desempenho econômico	Atmosfera	Pobreza
Governança	Presença de Mercado	Terra	Fome
Saúde	Impactos Econômicos	Água doce	Saúde e bem estar
Educação	Práticas de compra	Oceanos e mares	Educação de qualidade
Democracia	Materiais	Biodiversidade	Igualdade de gênero
Desastres naturais	Energia	Saneamento	Água potável e saneamento
Atmosfera	Água	População	Energias limpas
Solo	Biodiversidade	Trabalho e rendimento	Trabalho digno e desenvolvimento econômico
Oceanos	Emissões	Saúde	Inovação e Infraestrutura
Água potável	Resíduos e Efluentes	Educação	Desigualdades
Biodiversidade	Produtos e Efluentes	habitação	Cidades Sustentáveis
Desenvolvimento Econômico	Produtos e serviços	Segurança	Produção e Consumo Sustentável
Parcerias Econômicas	Conformidade	Quadro Econômico	Alterações Climáticas
Consumo e padrões de produção	Transporte	Padrões de produção e consumo	Oceanos e Mares
-	Avaliação de fornecedores	Quadro e Capacidade Institucional	Ecosistemas e Biodiversidade
-	Mecanismos de queixas	-	Paz e Justiça
-	Práticas trabalhistas	-	Parcerias para o desenvolvimento
-	Direitos Humanos	-	-
-	Sociedade	-	-
-	Responsabilidade sobre produto	-	-

FIGURA 4 – Matriz paritária

$$C \begin{bmatrix} 1 & x & \cdots & y \\ A1 & 1/x & 1 & \cdots & z \\ A2 & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ An & 1/y & 1/z & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Para fazer as comparações paritárias é necessário de uma escala de números que indica quantas vezes mais importante uma alternativa é em relação a outra seguindo o critério pré-estabelecido. De acordo com (SAATY, 2008) as alternativas podem ser comparadas usando a escala fundamental mostrada na Tabela 3. Atribuindo valores variando de 1 a 9, a escala determina a importância relativa de uma alternativa em relação à outra.

TABELA 3 – Escala Fundamental de Saaty

Escala	Análise Numérica	Reciprocidade
Extremamente mais importante	9	1/9
Muito mais importante	7	1/7
Mais importante	5	1/5
Moderada importância	3	1/3
Igual importância	1	1

Cada comparação, com valores atribuídos a todos os pares, gera uma matriz de avaliação  $n \times n$  como a matriz ilustrada na Figura 4:

Para preencher a matriz, o tomador de decisão atua por linhas. O que ele sabe de antemão é que a diagonal principal da matriz é preenchida com o valor 1 porque é a comparação de um elemento consigo mesmo. Depois de preencher a diagonal principal, a primeira linha deve fazer a pergunta sobre qual a relação do elemento com a outra, quanto mais importante é a contribuição de uma alternativa para outra. As comparações são de natureza subjetiva, o que gera a necessidade de avaliar a proximidade entre  $\lambda_{max}$  e  $n$ . Para isso, usamos a relação de consistência (RC), que é calculada da seguinte forma:

$$RC = IC/CR \quad (2.1)$$

$$IC = ((\lambda_{max} - n))/((n - 1)) \quad (2.2)$$

CR é o índice de consistência aleatória. O índice de consistência aleatória vem

de uma amostra aleatória de 500 matrizes recíprocas positivas de dimensão 11 em 11. Estes índices são demonstrados na Tabela 4.

TABELA 4 – Índice de consistência randômica.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RC	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

Uma matriz consistente é considerada quando o valor da razão de consistência é inferior a 0,10. Caso contrário, recomenda-se uma revisão da matriz de comparação.

Como resultado da análise, temos o grau de priorização de cada alternativa. A interpretação desta priorização é utilizada para a elaboração e validação da proposta do modelo.

#### Coleta de dados de entrada

A coleta de dados de entrada desde modelo se dá pela investigação nos relatórios de sustentabilidade e de gestão integrada da empresa. A base temporal da disponibilização destes relatórios são anuais, assim a escala de avaliação padrão para este modelo é anual. Quanto maior o número de relatórios investigados maior a confiabilidade dos dados coletados.

#### Processo de Avaliação

Nas próximas seções serão apresentados uma breve descrição dos métodos multi-atributos / multi-objetivos utilizados neste trabalho.

O processo de avaliação é realizado através do modelagem multi-atributos. Como já foi destacado existem diversas técnicas, como a AHP, ANP, MAUT, ELECTRE, TOPSIS, VIKOR, dentre outras. Porém quando se trata de ranqueamento de alternativas a técnica *outranking* PROMETHEE satisfaz os objetivos deste trabalho científico. Os passos do PROMETHEE são listados abaixo.

- a) Determinação dos desvios baseados na comparação paritária.

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j \quad (2.3)$$

Onde  $d_j(a, b)$  significa a diferença entre as avaliações de a e b quanto aos critérios estabelecidos.

- b) Aplicação da matriz de preferência.

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)]_j = 1., k, \quad (2.4)$$

Onde  $P_j(a, b)$  significa a preferência da alternativa A e B para o critério estabelecido em função de  $d_j(a, b)$ .

c) Cálculo do índice de preferência global.

$$\forall a, b \in A; \pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b) w_j \quad (2.5)$$

d) Cálculo dos fluxos individuais (PROMETHEE I).

$$\phi^+(a) = 1/(n-1) \sum_{X \in A} X \in A \quad (2.6)$$

$$\phi^-(a) = 1/(n-1) \sum_{X \in A} X \in A \quad (2.7)$$

Onde  $\phi^+(a), \phi^-(a)$  significa fluxos positivos e fluxos negativos, respectivamente, para cada alternativa.

e) Cálculo dos fluxos globais (PROMETHEE II).

$$\phi(a) = [\phi^+(a)] - [\phi^-(a)], \quad (2.8)$$

Onde  $\phi(a)$  significa o fluxo global para cada alternativa.

### Processo de Otimização

Com os resultados do PROMETHEE, o ranqueamento das alternativas através dos fluxos individuais e globais são realizadas cálculos estatísticos para análise da correlação e colinearidade bem como o desenvolvimento do modelo matemático de otimização multi-objetivo.

### Programação Matemática

A programação de Metas (PM) é conceituada como a generalização da programação linear e tem como objetivo superar as limitações intrínsecas aos modelos de programação linear (BAUMOL, 1962). A Programação por Metas permite considerar múltiplos objetivos com metas desejáveis a serem atingidas e se tem por concepção a noção de uma distância mínima das metas ótimas. Um ponto interessante da PM é que este método requer uma participação ativa do decisor, pode-se atribuir pesos aos desvios a serem minimizados. Também podem ser definidas prioridades as metas pré-estabelecidas. A Programação por Metas com priorização os objetivos são ordena-

dos de acordo com sua importância, a partir de uma priorização feita pelos decisores (MARTEL; AOUNI, 1998). A programação de metas seguem as seguintes etapas:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n (W_i^+ d_i^+) + (W_i^- d_i^-) \quad (2.9)$$

Onde:

$$X \in F, d_i^- \geq 0, d_i^+, d_i^- \geq 0, d_i^+ \cdot d_i^- = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.10)$$

$$Ax \leq C \quad (2.11)$$

$$x_i, d_i^+, d_i^- \geq 0, d_i^+ \cdot d_i^- = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.12)$$

Onde  $F_i(x)$  são as múltiplas funções objetivos e  $X$  é o vetor das variáveis de decisão  $X_i$ ;  $d_i^+, d_i^-$ , as variáveis auxiliares de desvio positivas e negativas, vinculadas a cada meta  $g_i$  estabelecida para os objetivos  $i$ ;  $W_i^+, W_i^-$ , os pesos atribuídos às variáveis de desvio  $d_i^+, d_i^-$ ;  $A$  e  $C$ , a matriz dos coeficientes do lado esquerdo (LHR) das variáveis e o vetor de constantes do lado direito (RHS), pelas restrições do modelo.

Com os pesos pré-estabelecidos, desenvolvemos um modelo matemático multiobjetivo com GP preventivo ou lexicográfico. Esse modelo de estabelecimento de metas orienta a tomada de decisão em relação a gastos e investimentos nas dimensões social e ambiental. Esses resultados são interpretados e, portanto, é possível tomar decisões que levem a mais sustentabilidade. A melhoria contínua é inevitável para a tomada de decisões, e esse método é continuamente atualizado e aprimorado. Um modelo clássico de GP pode ser expresso da seguinte maneira:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n |f_i(X) - g_i| \quad (2.13)$$

$$\text{s.t. } X \in F (F \text{ is a nivel set}) \quad (2.14)$$

onde  $f_i(X)$  é a função do  $i$ -ésimo objetivo e  $g_i$  é o nível de aspiração do  $i$ -ésimo objetivo.

O GP é proposto para minimizar os desvios dos objetivos e seus níveis de aspirações. Vários problemas de minimização podem ser resolvidos com vários tipos de métodos, como MIN MAX GP, GP ponderado e lexicográfico (GP preventivo), GP inteiro, GP não linear, GP estocástico, GP fracionário, GP iterativo, GP com intervalos,

GP de intervalo estendido, GP difuso e GP lexicográfico estendido difuso (AOUNI; KETTANI, 2001).

### Análise de Componentes Principais

É uma técnica estatística multivariada que busca capturar informações sobre a estrutura de correlação linear para variáveis de grupo correlacionadas (RENCHER, 2002). Essas informações são condensadas em um número menor de variáveis não correlacionadas, denominadas componentes principais (PCs), que representam as projeções das variáveis originais em novos eixos ortogonais.

Deixe  $X_{n \times k}$  uma matriz de conjunto de dados centrada em  $k$  variáveis correlacionadas, em que cada linha contém uma observação da variante  $k$ , representada por  $x'_{j1xp}$ . A estrutura de correlação da matriz  $X$  é obtida na matriz de covariância da amostra (ou correlações)  $S_{k \times k}$ . Como essa matriz é simétrica e não singular, existe uma matriz ortogonal  $U_{k \times k}$  que diagonaliza  $S$ . Assim, temos  $U'SU = S_c$ , onde  $S_c$  é uma matriz diagonal que contém os valores próprios de  $k$   $\lambda_t$  valores positivos para  $S$ . A matriz  $U$  apresenta em suas colunas os  $k$ -autovetores  $u_t$  que carregam as cargas da combinação linear para projetar as variáveis originais no eixo ortogonal  $th^{th}$  dado pelo  $t^{th}$  PC, para  $t = 1, \dots, k$ . O vetor próprio  $\lambda_t$  descreve a variação do  $th^{th}$ .

O vetor  $z_{t(n \times 1)}$  traz as pontuações para o PC  $t^{th}$  das  $n$  observações iniciais, obtidas através de  $z_t = Xu_t$ , para  $t=1, \dots, k$ . Considerando que cada variável segue uma distribuição Normal, o PC  $th^{th}$  segue uma distribuição Normal com média 0 e variação  $\lambda_t$ .

A projeção de uma nova observação  $k$  variada pelo vetor  $x(k \times 1)$ , em eixos ortogonais definidos pelos PCs, é obtida por  $z = U'x$ . Onde  $z = [z_1, z_2, \dots, z_w]$  é o vetor que contém as pontuações  $w$  para as novas observações; a matriz  $U = [u_1|u_2|\dots|u_w]$  contém em suas colunas os autovetores associados e  $U'$  representa sua transposição (MARCONDES; SANT'ANNA, 2015).

### Previsão

O desenvolvimento de modelos de previsão tem como objetivo a simulação de cenários futuros para auxiliar no planejamento estratégico das organizações. Uma das técnicas empregadas para esta previsão é a regressão. A regressão linear múltipla é uma generalização da regressão linear simples quando há mais de uma variável independente. O modelo básico para regressão linear múltipla é:

$$\gamma_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_p X_{ip} + \epsilon_i \quad (2.15)$$

para cada observação  $i = 1, \dots, n$ .



O valor  $n$  são as observações de uma variável dependente e  $p$  as variáveis independentes. Onde  $\gamma_i$  é a  $i$ -observação da variável dependente,  $X_{ij}$  ocorre com a observação da variável independente  $j$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$ . Os valores  $\beta_j$  são os parâmetros a serem estimados e  $\epsilon_i$  é o  $i$ -ésimo erro normal distribuído de forma idêntica. Na regressão linear multivariada, existe uma equação para cada uma das variáveis dependentes  $m > 1$  que compartilham o mesmo conjunto de variáveis independentes e, portanto, são estimadas simultaneamente (CHRISTOPHER FREY; PATIL, 2002).

### Teste de Sensibilidade

Um teste de sensibilidade é realizado a partir da alteração dos dados de entrada. A análise da sensibilidade é o ato de estudar o efeito que a variação de um dado de entrada pode ter sobre os resultados. Métodos para análise de sensibilidade são divididos em matemáticos, estatísticos e gráficos. Os métodos estatísticos envolvem simulações com variações de entradas e análise do efeito nos resultados (CHRISTOPHER FREY; PATIL, 2002).

Na proposta deste modelo é executado testes de sensibilidade para se testar a robustez do modelo de avaliação e do modelo de otimização. No processo de avaliação o teste pode ser realizado modificando as entradas, como as quantidades de indicadores avaliados, os pesos associados bem como a mudança dos próprios indicadores. No modelo de otimização o teste de sensibilidade através dos modelos matemáticos são os mais adequados.

### Análise dos resultados

Os resultados de cada etapa são validados com o teste de sensibilidade com uma discussão acerca da sua contribuição para a tomada de decisões. Na medida que os resultados são analisados é decidido o prosseguimento para a próxima etapa ou a volta para reavaliação. O modelo propõe resultados como:

- Desempenho da organização através dos anos;
- Modelo matemático ótimo com proposta de melhoria para o futuro;
- Modelo de previsão para planejamento futuro.

### 3 COLETÂNEA DE ARTIGOS

#### 3.1 ARTIGO 01 - ESTADO DA ARTE

##### MODELOS MULTICRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA PERFORMANCE DA SUSTENTABILIDADE: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

---

**STATUS** - Previsão de submissão ao *Journal of Cleaner Production* (ISSN: 0959-6526). *Impact Factor*: 6.395.

---

**RESUMO** - A sustentabilidade é sem dúvida um fator importante para a competitividade de qualquer organização. A proposta deste artigo é uma revisão sistemática com a análise das abordagens para avaliação e otimização da sustentabilidade organizacional. Um estudo sobre o desempenho da sustentabilidade e uma análise quantitativa das abordagens quantitativas para avaliação e otimização da sustentabilidade. Para esta análise é utilizada a técnica Análise Hierárquica dos Processos(AHP) que compara as abordagens quanto os critérios de intensidade, acuracidade, adaptabilidade e simplicidade. As alternativas são as abordagens quantitativas, Métodos de Programação Matemática (MPM), Métodos Heurísticos (HM), Métodos de Simulação (SM) e Modelos Analíticos (AM). Como resultados alcançados, o MPM é o mais apropriado para os critérios estabelecidos e julgados neste artigo com prioridade de 36,42%, seguido pelas abordagens baseadas em AM com 29,21%, SM com 20,35% e HM com 14,01%.

**PALAVRAS-CHAVE:** MCDA, Sustentabilidade, Desempenho da Sustentabilidade, AHP, Revisão Sistemática.

*Multicriteria Models for Sustainability Assessment and Optimization: A Systematic Review*

**ABSTRACT** - Sustainability is undoubtedly an important factor for the competitiveness of any organization. The purpose of this paper is a systematic review with the analysis of the approaches to assessment and optimization of organizational sustainability. A study on sustainability performance and a quantitative analysis of quantitative approaches to sustainability assessment and optimization. For this analysis the Hierarchical Process Analysis (AHP) technique is used, which compares the approaches as the criteria of intensity, accuracy, adaptability and simplicity. Alternatives are quantitative approaches, Mathematical Programming Methods (MPM), Heuristic Methods (HM), Simulation Methods (SM) and Analytical Models (AM). As a result, MPM is the most appropriate for the criteria established and judged in this paper with priority of 36.42 %, followed by approaches based on AM with 29.21 %, SM with 20.35 % and HM with

14.01 %.

**KEYWORDS:** MCDA, Sustainability, Sustainability Performance, AHP, Systematic Review.

### 3.1.1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais, o que o mundo precisa é de uma transformação importante para os padrões de produção e consumo, para a melhoria contínua do bem-estar humano e a proteção dos recursos naturais. O bem-estar humano possui múltiplas dimensões e o objetivo da sustentabilidade visa melhorar todas elas (FIKSEL et al., 2014). A definição mais popular da sustentabilidade foi apresentada pela Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento em 1987 como: "Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades". A sustentabilidade busca garantir que os recursos disponíveis hoje não são utilizados para privar os benefícios econômicos, ambientais e sociais das gerações futuras (CORY SEARCY, 2015).

A necessidade de avaliar o desempenho das empresas em termos de sustentabilidade é uma dificuldade, uma vez que a sustentabilidade incorpora parâmetros de múltiplos critérios, alguns complexos no caminho do desenvolvimento sustentável. A avaliação da sustentabilidade desempenha um papel importante na consecução das metas de desenvolvimento sustentável, pois identifica os pontos fortes e fracos das organizações em relação ao desempenho econômico, social e ambiental. A partir dos resultados da avaliação de desempenho obtida, as organizações podem atuar na melhor tomada de decisão usando critérios sustentáveis (FARLEY; SMITH, 2013).

A sustentabilidade é então parte integrante do mundo dos negócios e está inserida em todas as etapas da cadeia de suprimentos, consolidando-se como fator de competitividade (PAGELL; WU, 2009). De acordo com Kuo et al. (2017) os cinco fatores de influência na cadeia de suprimentos sustentável que determinam o sucesso ou o fracasso são: pressão, estratégia, incerteza, gerenciamento interno e gerenciamento externo.

Vários modelos de análise sustentável da cadeia de suprimentos são baseados no escopo dos modelos analíticos. São ferramentas utilizadas na Ecologia Industrial para quantificar e avaliar os impactos ambientais da geração de resíduos, emissões gasosas, consumo de recursos, água e energia de toda a cadeia de produtos, desde o "berço" até o "túmulo" ou durante todo o seu ciclo de vida (FIKSEL et al., 2014). Embora os avanços na prática e na teoria tenham contribuído para a Cadeia de suprimentos sustentável (SSC), a questão está longe de ser madura (KIRCHOFF; OMAR; FUGATE, 2016).

A gestão sustentável da cadeia de suprimentos pode reduzir o impacto ambiental da atividade industrial sem sacrificar a qualidade, custo, confiabilidade, desempenho

ou eficiência energética. No entanto, as dimensões que marcam a sustentabilidade influenciam todas as organizações constituintes de uma cadeia produtiva, não apenas uma organização ou empresa focal (DIAS; LABEGALINI; CSILLAG, 2012). As organizações precisam de uma estrutura abrangente de avaliação da sustentabilidade para auxiliar os profissionais na implementação de modelos de sustentabilidade (CHOFREH; GONI, 2017).

Algumas abordagens são identificadas por (BRANDENBURG; GOVINDAN et al., 2014). Entre eles estão os modelos analíticos, matemáticos, heurísticos e de simulação. É necessário estudar mais sobre o tema, suas inter-relações e identificar as abordagens mais apropriadas para uso na cadeia de suprimentos de petróleo e gás.

A proposta deste artigo é a elaboração de uma revisão sistemática dos modelos multicritérios de avaliação e otimização da sustentabilidade bem como a análise das abordagens através da AHP.

### **3.1.2 MATERIAIS E MÉTODOS**

A revisão sistemática é importante, principalmente quando os pesquisadores não têm certeza das barreiras e dificuldades que terão durante a pesquisa. Eles ainda defendem que através da revisão os estudiosos podem melhorar as atividades do estudo, orientar-se e descobrir os melhores caminhos conceituais e desenvolvê-las de forma mais simples e objetiva. A fase exploratória da pesquisa envolve a descoberta das pesquisas publicadas qualitativamente e quantitativamente.

Pode-se observar na literatura pesquisada que a Análise Hierárquica dos Processos (AHP) é um método amplamente utilizado para priorizar as alternativas (MACHARIS; TURCK SIN; LEBEAU, 2012). A AHP proposto por Saaty (2008) é um método de decisão com vários critérios para problemas complexos e funciona para os mais diversos tipos de casos. A AHP é amplamente usado para priorizar e tomar a melhor decisão quando aspectos qualitativos e quantitativos precisam ser considerados. A maioria das pesquisas envolve abordagens determinísticas, deixando de lado técnicas estocásticas e negligenciando parâmetros sociais (BRANDENBURG; REBS, 2015). A técnica utilizada nessa identificação é o AHP, com abordagem qualitativa e quantitativa, com coleta secundária de dados, através de um estudo exploratório em 46 artigos mais relevantes e destacados da comunidade científica.

As etapas da Análise Hierárquica dos Processos são estabelecidas da seguinte forma:

FIGURA 5 – Matriz da AHP

$$\begin{array}{l}
 C \\
 A1 \\
 A2 \\
 \vdots \\
 An
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 1 & x & \cdots & y \\
 1/x & 1 & \cdots & z \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 1/y & 1/z & \cdots & 1
 \end{bmatrix}$$

- Identificação das alternativas e dos critérios;
- Estabelecer a significância relativa entre os critérios;
- Especificar as preferências para as alternativas;
- Realizar comparação paritária entre os critérios;
- Calcular os valores globais de preferência para cada alternativa.

Para fazer as comparações paritárias é necessário de uma escala de números que indica quantas vezes mais importante uma alternativa é em relação a outra seguindo o critério pré-estabelecido. De acordo com (SAATY, 2008) as alternativas podem ser comparadas usando a escala fundamental mostrada na Tabela 5. Atribuindo valores variando de 1 a 9, a escala determina a importância relativa de uma alternativa em relação à outra.

TABELA 5 – Escala Fundamental de Saaty

Escala	Análise Numérica	Reciprocidade
Extremamente mais importante	9	1/9
Muito mais importante	7	1/7
Mais importante	5	1/5
Moderada importância	3	1/3
Igual importância	1	1

Cada comparação, com valores atribuídos a todos os pares, gera uma matriz de avaliação  $n \times n$  como a matriz ilustrada na Figura 5:

Para preencher a matriz, o tomador de decisão atua por linhas. O que ele sabe de antemão é que a diagonal principal da matriz é preenchida com o valor 1 porque é a comparação de um elemento consigo mesmo. Depois de preencher a diagonal principal, a primeira linha deve fazer a pergunta sobre qual a relação do elemento com a outra, quanto mais importante é a contribuição de uma alternativa para outra. As comparações são de natureza subjetiva, o que gera a necessidade de avaliar a

proximidade entre  $\lambda_{max}$  e  $n$ . Para isso, usamos a relação de consistência (RC), que é calculada da seguinte forma:

$$RC = IC/CR \quad (3.1)$$

$$IC = ((\lambda_{max} - n))/((n - 1)) \quad (3.2)$$

CR é o índice de consistência aleatória. O índice de consistência aleatória vem de uma amostra aleatória de 500 matrizes recíprocas positivas de dimensão 11 em 11. Estes índices são demonstrados na Tabela 6.

TABELA 6 – Índice de consistência randômica.

<b>n</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>RC</b>	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

Uma matriz consistente é considerada quando o valor da razão de consistência é inferior a 0,10. Caso contrário, recomenda-se uma revisão da matriz de comparação.

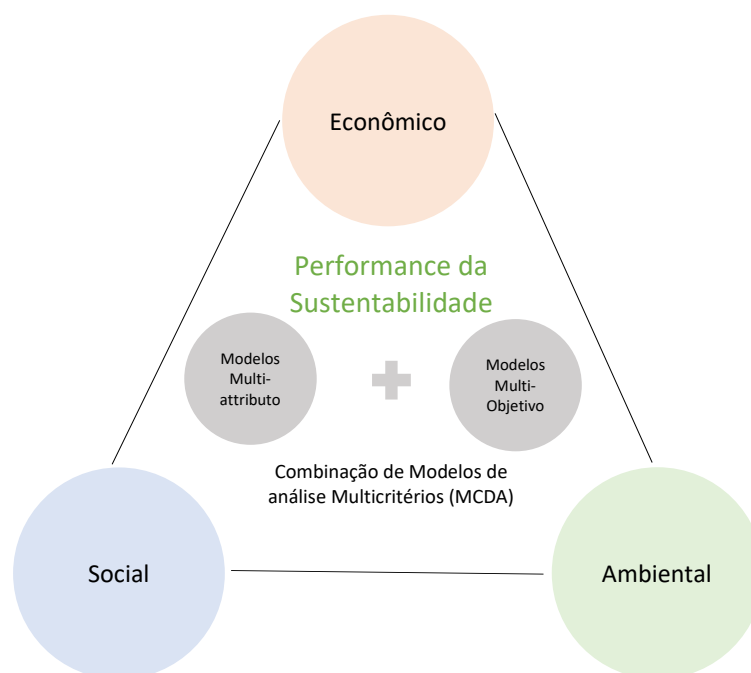
Como resultado da análise, temos o grau de priorização de cada alternativa. A interpretação desta priorização é utilizada para a elaboração e validação da proposta do modelo.

Esta pesquisa analisa e identifica modelos quantitativos através de quatro abordagens. Essas abordagens são as mais proeminentes da comunidade científica, de acordo com Seuring (2013), Brandenburg, Govindan et al. (2014), Mattiussi, Rosano e Simeoni (2014), Eskandarpour et al. (2015), que são baseados em modelos analíticos (AM), métodos de programação matemática (MPM), métodos heurísticos (HM) e métodos de simulação (SM). A Figura 14 contém as abordagens, técnicas e métodos de solução. Também a quantidade de artigos pesquisados na comunidade científica para verificar a proeminência de cada um.

### 3.1.3 REVISÃO SISTEMÁTICA

A revisão sistemática possui a seguinte abrangência, conforme ilustração da Figura 6. Esta por sua vez envolvem a avaliação e otimização do desempenho da sustentabilidade na cadeia do petróleo e gás utilizando modelos de avaliação multicritérios, seja multi-objetivos e multi-atributos. Uma revisão sistemática que envolve não apenas uma abordagem quantitativa, mas principalmente uma abordagem qualitativa.

FIGURA 6 – Abrangência da Revisão



FONTE: Elaborado pelo autor.

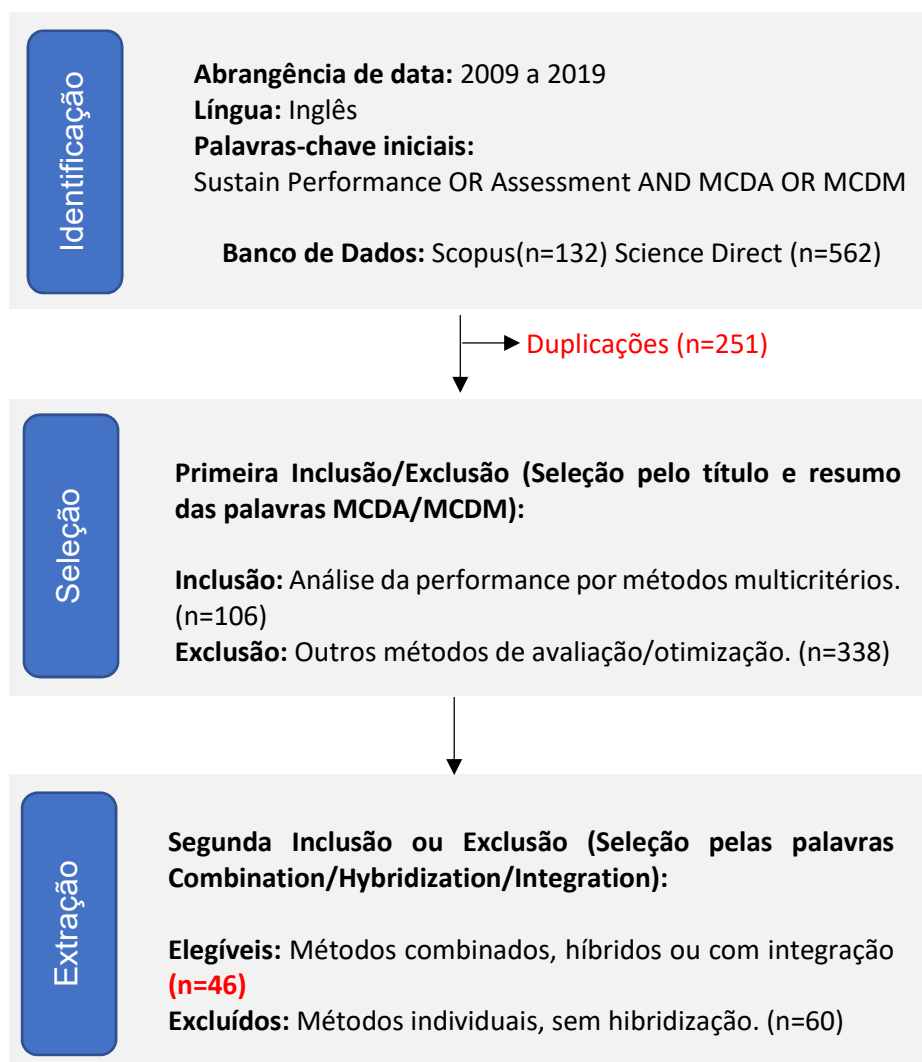
Para a revisão sistemática utilizou-se a ferramenta de revisão sistemática StArt (*State of the Art through Systematic Review*) desenvolvida pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (LaPES) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Os procedimentos de seleção dos trabalhos científicos estão ilustrados na Figura 7. As bases de dados escolhidas para a prospecção foram o Science Direct e o Scopus. Não foram escolhidas mais bases de dados para evitar as duplicações dos artigos na análise.

Para ser incluído em nossa revisão sistemática, primeiro, uma triagem prática dos títulos e resumos foi realizado após a próxima inclusão critério. Um estudo teve que atender aos seguintes critérios para ser incluído:

- O estudo deve ser um artigo publicado em uma revista com revisão por pares nas principais bases nos últimos dez anos (2009–2019). Portanto, outras formas de publicação (anais de conferências, livros, jornais artigos, trabalhos inéditos) não foram incluídos.
- O estudo deve tratar as técnicas quantitativas multicritérios para avaliação e otimização da sustentabilidade corporativa.
- O estudo deve realizar a combinação de abordagens multi-atributos e multi-objetivos para avaliar e otimizar o desempenho da sustentabilidade organizacional



FIGURA 7 – Procedimentos de Seleção



FONTE: Elaborado pelo autor.

de forma integrada.

Em um primeiro momento, foram prospectados trabalhos científicos dos últimos 10 anos (2009-2019), em inglês, com as palavras-chave: Sustain Performance OR Assessment AND MCDM OR MCDA. Nesta busca, foram encontrados 132 trabalhos na base Scopus e 562 na base Science Direct.

Na fase de seleção foram excluídas automaticamente 251 artigos duplicados. Foram selecionados artigos contendo no seu título e no resumo as palavras-chave como: *Multiple-criteria decision-making*, MCDM, *multiple-criteria decision analysis* e MCDA. Também foram utilizadas palavras alternativas como: *multi-criteria*, *multicriteria*, *multiplecriteria*. Nesta primeira inclusão/exclusão foram incluídos 106 trabalhos e excluídos 338 trabalhos.

FIGURA 8 – Palavras mais proeminentes no título e resumo



FONTE: Elaborado pelo autor.

FIGURA 9 – Palavras mais proeminentes dos periódicos



FONTE: Elaborado pelo autor.

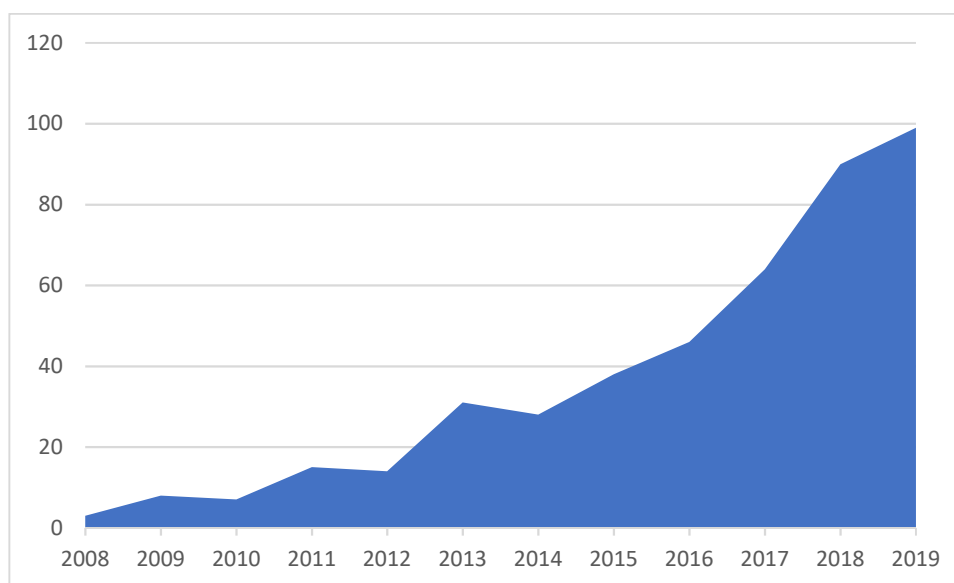
Na fase de extração foram selecionados pelas palavras-chave como: *Combination* e/ou *Hybridization* e/ou *Integration*. Também foram buscadas palavras como *Combin*, *Hybrid* e *Integra*. Foram extraídos 46 trabalhos para o estudo qualitativo das suas abordagens e das referências e foram excluídos 60 trabalhos científicos.

Na primeira seleção dos trabalhos destacou-se alguns resultados. As palavras mais proeminentes contidos nos resumos estão destacadas na Figura 8, *Sustainability*, *Assessment*, *Multi-Criteria Decision Making* e *AHP*. As palavras mais proeminentes para os nomes dos periódicos estão destacadas na Figura 9, *Journal*, *Cleaner*, *Production*, *Sustainable* e *Energy*.

Com destaque para os anos da publicação pode-se observar que as pesquisas sobre o tema está em franco crescimento, tendo como 2019 o ano que mais se publicaram trabalhos científicos sobre o tema, com cerca de 100 artigos associados a performance da sustentabilidade utilizando de modelos multi-critérios de avaliação e otimização. A Figura 10 ilustra esta informação.

Sobre onde os trabalhos científicos estão sendo publicados, a análise destaca os periódicos com maiores quantidades de publicações. O *Journal of Cleaner Production*, com cerca de 100 artigos desponta como o principal periódico de referência sobre o tema ele é um A1 e tem fator de impacto de 6,395. O segundo e terceiro colocados com cerca de 20 artigos cada um, o *Science of The Total Environment* com fator de impacto de 5,589 e o *Renewable and Sustainable Energy Reviews* com fator de impacto

FIGURA 10 – Publicações nos últimos 10 anos.



FONTE: Elaborado pelo autor.

impressionante de 10,556. Um periódico com publicações abertas de destaque foi o *Sustainability (Switzerland)* com cerca de 10 publicações e com fator de impacto de 2,592. Esta análise está ilustrada na Figura 11.

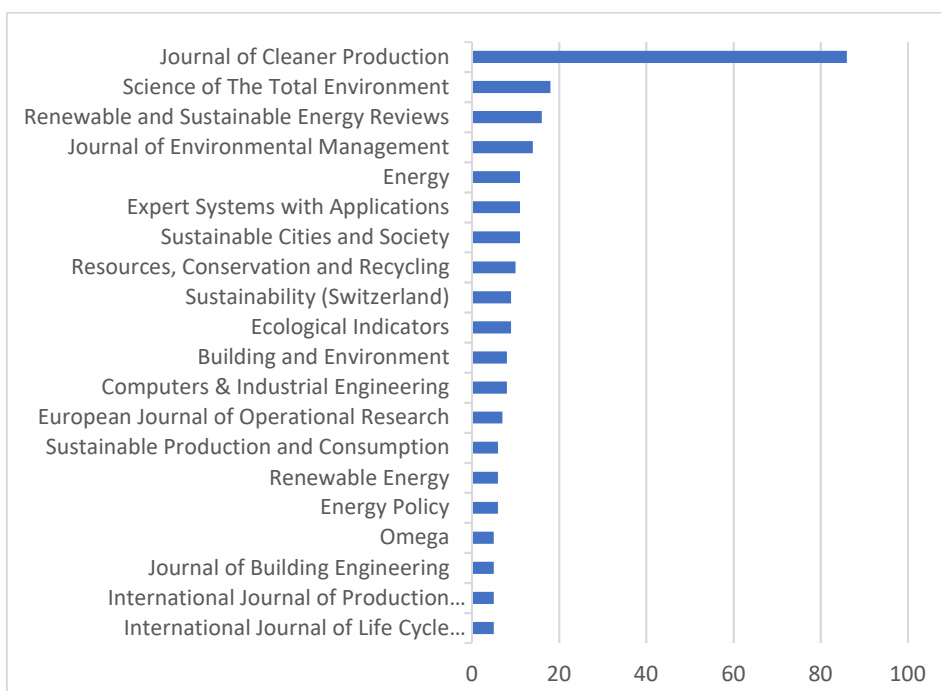
Os autores mais proeminentes de acordo com o tema da pesquisa são ilustrados na Figura 12. Kannan Govindan, com impressionante cinco trabalhos científicos, Jingzheng Ren com quatro trabalhos, Oriol Pons com três trabalhos e Kajal Chatterjee, Kropp W. e Sadok, W. com dois trabalhos cada um.

Sobre os métodos e técnicas mais proeminentes nos trabalhos pesquisados estão os referenciados na Figura 13. A Análise Hierárquica dos Processos é sem dúvida o método de avaliação multicritério mais proeminente dos últimos 10 anos, seguidos da Avaliação do Ciclo de Vida ou Custo, Lógica Fuzzy, TOPSIS, DEA e Vikor. Também aparecem a ANP, PROMETHE, ELECTRE, MIVES, , Goal Programming, MAUT, MAVT e outros métodos menos proeminentes porém que apareceram na pesquisa.

#### 3.1.4 ABORDAGEM DOS ARTIGOS

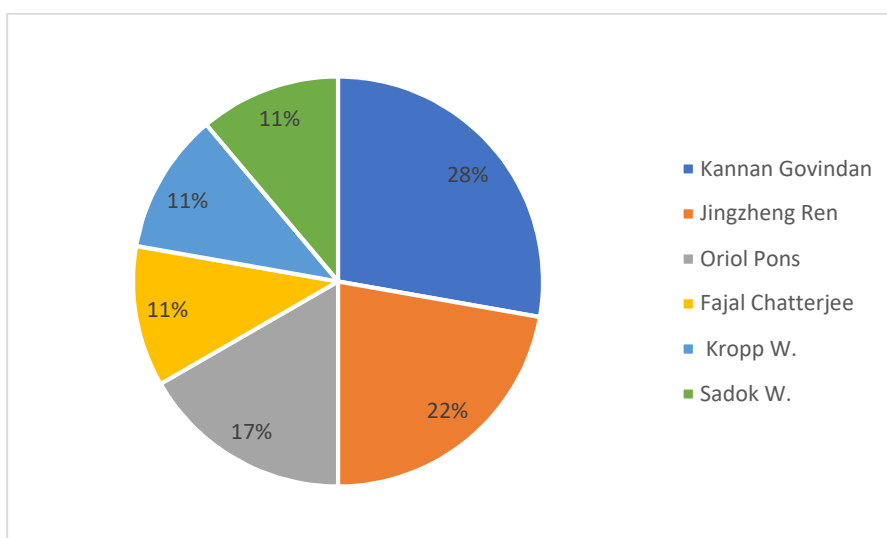
Levando em consideração os procedimentos de seleção, extração e elegibilidade da etapa anterior. O estudo das abordagens dos artigos elegíveis se faz necessário. A Tabela 7 ilustra os artigos de revisão mais proeminentes sobre sustentabilidade, cadeia de suprimentos sustentável ou modelos quantitativos para avaliação e otimização da

FIGURA 11 – Publicações por periódicos



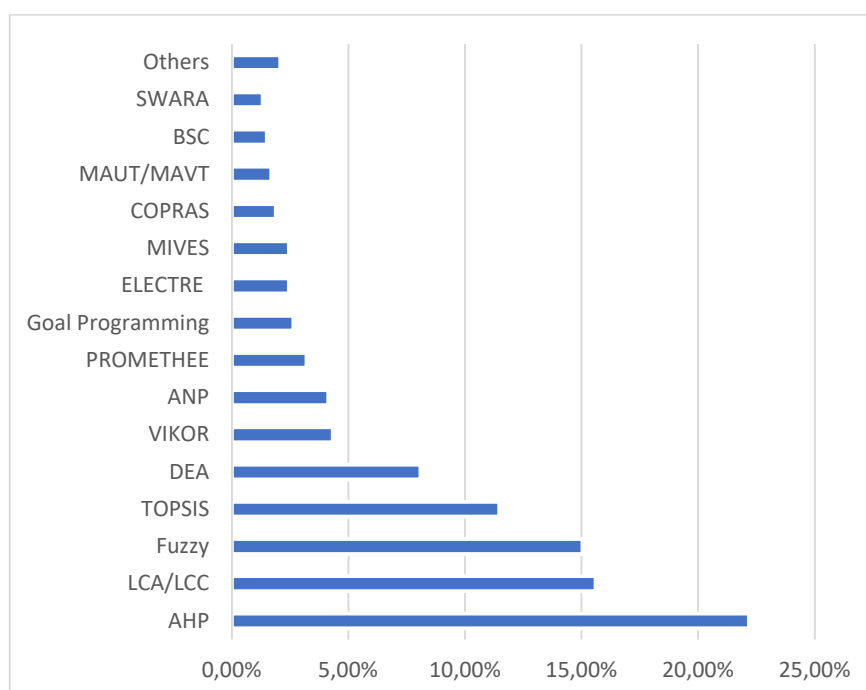
FONTE: Elaborado pelo autor.

FIGURA 12 – Autores que mais publicam



FONTE: Elaborado pelo autor.

FIGURA 13 – Métodos mais proeminentes



FONTE: Elaborado pelo autor.

performance da sustentabilidade. Estes artigos são importantes na confecção do estado da arte bem como no direcionamento das pesquisas no uso dos conceitos das técnicas propostas.

A tabela 8 destaca os 46 artigos selecionados para o tema do trabalho mostrando um resumo de cada artigo, com autores, objetivos, local da pesquisa, o setor e as técnicas e métodos empregados. Estes trabalhos de alguma forma combinaram métodos multicritérios para análise e/ou otimização da performance da sustentabilidade.

TABELA 7 – Artigos de revisão sobre o tema.

<b>N</b>	<b>Referência</b>	<b>Objetivo/Esopo</b>	<b>Ano</b>	<b>Abrangência</b>	<b>Citações</b>
1	(SEURING; MÜLLER, 2008)	Revisão de literatura sobre cadeias de suprimentos sustentáveis	2008	1994-2007	2187
2	(GOLD; SEURING; BESKE, 2009)	Revisão sobre gestão da cadeia de suprimentos sustentável.	2010	1994-2007	498
3	(CARTER; EASTON, 2011)	Evolução da sustentabilidade em cadeias de suprimentos.	2011	1991-2010	776
4	(WINTER; KNEMEYER, 2013)	Integração da sustentabilidade com a cadeia de suprimentos	2013	1995-2010	197
5	(AHI; SEARCY, 2013)	Conceitos e definições de cadeias verdes e sustentáveis	2013	1995 de 2012	433
6	(BRANDENBURG; GOVINDAN et al., 2014)	Modelos quantitativos para gestão da cadeia de suprimentos sustentável	2014	-	487
7	(TONELLI et al., 2014)	Ferramentas para tomada de decisão em cadeias de suprimentos sustentáveis	2014	2000-2013	90
8	(TOUBOULIC; WALKER, 2015)	Teorias sobre cadeias de suprimentos sustentáveis	2015	1995-2013	208
9	(KHALID et al., 2015)	Conceitos sobre cadeias de suprimentos sustentável	2015	2000-2014	32
10	(ESKANDARPOUR et al., 2015)	Revisão sobre modelos e técnicas de solução para cadeias de suprimentos sustentáveis	2015	1994-2014	224
11	(ANSARI; KANT, 2017)	Revisão de literatura sobre gestão de cadeias de suprimentos sustentáveis	2017	2002-2017	65
12	(MARDANI et al., 2017)	Aplicações de métodos multicritérios para resolução de problemas no setor de energia	2017	1995-2015	75
13	(THIES et al., 2019)	Pesquisa operacional na avaliação da sustentabilidade de produtos	2019	1995-2018	7

TABELA 8 – Abordagens dos artigos selecionados.

N	Referência	Objetivo/Escopo	Local	Setor	Métodos Utilizados
1	(AWASTHI; CHAUHAN; OMRANI, 2011)	Método de decisão multicritério para selecionar sistemas de transporte de sustentabilidade.	NA	Transportes	Fuzzy e TOPSIS
2	(GOVINDAN; KHODAVERDI; JAFARIAN, 2013)	Uma abordagem para medir o desempenho de sustentabilidade de fornecedores.	NA	Cadeia de Suprimentos	Fuzzy e TOPSIS
3	(RABBANI et al., 2014)	Avaliação do desempenho da sustentabilidade das empresas produtoras de petróleo no Irã.	Irã	Petróleo e gás	COPRAS, ANP, Fuzzy, BSC
4	(POUREBRAHIM et al., 2014)	Método para seleção entre critérios e alternativas para o desenvolvimento de conservação.	Irã	Área Costeira	AHP, VIKOR, Fuzzy
5	(MATTIUSI; ROSANO; SIMEONI, 2014)	Proposta de estrutura para projeto e produção sustentável da planta energética.	Austrália	Energia	MODM e AHP
6	(JATO-ESPINO et al., 2014)	Modelo para a seleção de pavimentos permeáveis urbanos	NA	Construção Civil	MIVES, AHP, FUZZY, MONTECARLO
7	(REN; LÜTZEN, 2015)	Metodologia de seleção de tecnologia para redução de emissões do transporte marítimo.	NA	Transporte	Fuzzy, AHP, VIKOR
8	(ROSTAMZADEH et al., 2015)	Modelo de avaliação das atividades das cadeias de suprimentos verdes.	Malásia	Informática	Fuzzy e VIKOR
9	(LUTHRA; MANGLA; KHARB, 2015)	Avaliação sustentável no planejamento e gerenciamento de energia.	Índia	Energia	Fuzzy + AHP
10	(ROSÉN et al., 2015)	Método para avaliar a sustentabilidade da remediação de terras contaminadas	NA	Terras Contaminadas	SCORE, Simulação de Monte Carlo
11	(MEDINECKIENE et al., 2015)	Técnica MCDA para selecionar critérios para a sustentabilidade da construção.	NA	Construção Civil	AHP e ARAS
12	(GOVINDAN; SHANKAR; KANNAN, 2016)	Modelo para avaliar o melhor material de construção sustentável.	Emirados Árabes	Construção Civil	Dematel, ANP, TOPSIS
13	(HAGHIGHI; TORABI; GHASEMI, 2016)	Método para avaliação de desempenho em cadeias de suprimentos sustentáveis.	Irã	Indústria de Polímeros	BSC e DEA
14	(AN20164647)	Método para avaliação da sustentabilidade na priorização da escolha de tecnologias.	NA	Recursos Hídricos	Fuzzy e Electre
15	(WANG; XU et al., 2017)	Método de avaliação para a avaliação da sustentabilidade de geração de energia.	NA	Energia	Fuzzy, TOPSIS, GRA
16	(DIAZ-SARACHAGA; JATO-ESPINO; CASTRO-FRESNO, 2017)	Metodologia para avaliar os sistemas de infraestrutura de sustentabilidade	NA	Planejamento Regional	MIVES e AHP
17	(HERAVI; FATHI; FAEGHI, 2017)	Método para avaliar a sustentabilidade e para a seleção ideal de opções sustentáveis.	Irã	Construção Civil	ELECTRE, GRA, OWA
18	(BALEŽENTIS; STREIMIKIENE, 2017)	Método para classificar os cenários de desenvolvimento de energia.	União Europeia	Energia	ARAS, TOPSIS, Monte Carlo
19	(ARSIĆ; NIKOLIĆ; ŽIVKOVIĆ, 2017)	Modelo para estratégias de priorização do desenvolvimento sustentável do ecoturismo.	Servia	Ecoturismo	Fuzzy e AHP
20	(ONU et al., 2017)	Método de avaliação para seleção de opções sustentáveis de controle da chuva ácida.	Nigéria	Chuva Ácida	Fuzzy e TOPSIS
21	(JAUHAR; PANT; NAGAR, 2017)	Modelo para avaliar a eficiência da sustentabilidade da cadeia de suprimentos.	Índia	Educação	DEA e DE
22	(GOVINDAN; DARBARI et al., 2017)	Método para seleção de fornecedores baseado na ecoeficiência.	Índia	Cadeia de Suprimentos	MILP, Fuzzy
23	(MAHJOURI et al., 2017)	Método multicritério de seleção da tecnologia de tratamento de águas residuais.	Irã	Tratamento de Água	AHP, Fuzzy, TOPSIS
24	(BAPPY et al., 2019)	Avaliação da sustentabilidade da cadeia de suprimentos e produção limpa.	NA	cadeia de suprimentos	AHP, Dempster-shafer theory
25	(BUI et al., 2018)	Método de avaliação da sustentabilidade social dos recursos hídricos subterrâneos.	Índia	Recursos Hídricos	AHP + Programação Linear
26	(DENG et al., 2018)	Avaliação de desempenho de sustentabilidade para empresas de Contabilidade	Taiwan	Contabilidade	DEMATEL, ANP, VIKOR
27	(LU et al., 2018)	Avaliação do desempenho dos aeroportos para garantir o desenvolvimento sustentável.	Taiwan	Aeroportos	DEMATEL, ANP, VIKOR
28	(SHAABAN)	Avaliação da sustentabilidade de tecnologias de geração de eletricidade.	Egito	Energia	Soma Ponderada + AHP
29	(wu10061700)	Método de tomada de decisão para avaliação da sustentabilidade de unidades de energia	China	Energia	AHP, Fuzzy Rough Set, AGRA, Monte Carlo
30	(MCKENNA et al., 2018)	Abordagem para o desenvolvimento de conceitos viáveis de energia.	Alemanha	Energia	MILP e MAVT
31	(Engida)	Método para avaliação da sustentabilidade corporativa.	NA	Alimentos e Bebidas	PCA + DEA
32	(Sreekumar)	A avaliação e seleção de estratégias para o desenvolvimento sustentável.	NA	Cadeia de Suprimentos	AHP, TOPSIS, SOWIA
33	(ZOLFANI et al., 2018)	Método para avaliar projetos de construção de hotéis sustentáveis.	Irã	Construção Civil	SWARA e COPRAS
34	(GHORABAE et al., 2018)	Método para avaliação da sustentabilidade de equipamentos de construção.	NA	Construção Civil	SWARA e EDAS
35	(MOUSAVI-NASAB; SOTOUDEH-ANVARI, 2018)	Proposta de método de seleção sustentável de materiais.	NA	Materiais	COPRAS, TOPSIS, VIKOR
36	(CHATTERJEE; PAMUCAR; ZAVADSKAS, 2018)	Método de avaliação do desempenho de fornecedores da cadeia de suprimentos.	NA	Indústria Eletrônica	DEMATEL, ANP, MAIRCA
37	(MOHAMMED et al., 2018)	Método sustentável de seleção de pedidos para uma cadeia de suprimentos de carne.	NA	Alimentos e Bebidas	AHP, FUZZY, TOPSIS, PL
38	(PADHI; PATI; RAJEEV, 2018)	Estrutura para selecionar indústrias sustentáveis na cadeia de suprimentos.	Índia	Cadeia de Suprimentos	Fuzzy, TOPSIS, PCA
39	(WU et al., 2019)	Método Híbrido de gestão do conhecimento para o desenvolvimento sustentável.	China	Gestão do Conhecimento	ANP e Fuzzy
40	(VIVAS et al., 2019)	Método de avaliação e otimização da sustentabilidade de cadeia de suprimentos	Brasil	Petróleo e Gás	PROMETHEE, AHP, Goal Programming
41	(MAHMOUDI et al., 2019)	Proposta é aplicada para avaliar o desempenho das usinas termelétricas.	Irã	Energia	DEA, TOPSIS, Game Theory
42	(NOGUÉS; GONZÁLEZ-GONZÁLEZ; CORDERA, 2019)	Método de avaliação de sustentabilidade nos níveis local e regional.	Espanha	Planejamento Regional	Fuzzy, TOPSIS, PCA
43	(SOLANGI et al., 2019)	Metodologia para avaliar estratégias de energia para sustentabilidade.	Paquistão	Energia	SWOT-AHP, Fuzzy-TOPSIS
44	(LIU et al., 2019)	Método de tomada de decisão multicritério para selecionar o fornecedor mais qualificado.	NA	Cadeia de Suprimentos	QFD, Fuzzy e VIKOR
45	(TABATABAEE et al., 2019)	Modelo de avaliação na instalação de telhado verde.	NA	Construção Civil	Delphi, Fuzzy, DEMATEL
46	(GHENAI; ALBAWAB; BETTAYEB, 2020)	Metodologia para avaliação da sustentabilidade dos sistemas de energia renovável.	NA	Energia	SWARA e ARAS

### 3.1.5 ANÁLISE DAS ABORDAGENS

A segunda etapa da pesquisa a análise das abordagens, ilustrado na Figura 14 é realizada usando a técnica Análise Hierárquica dos Processos (AHP). A AHP proposta por Saaty (2008) é um método de decisão com vários critérios para problemas complexos e funciona para os mais diversos tipos de casos. O AHP é amplamente usado para priorizar e tomar a melhor decisão quando aspectos qualitativos e quantitativos precisam ser considerados. O AHP geralmente é dividido em cinco estágios: definição do objetivo; Definição de critérios e subcritérios; Comparação de alternativas; Agregação e ponderação. Em um primeiro passo é preciso reunir informações necessárias sobre as abordagens que serão analisadas.

#### 3.1.5.1 Programação Matemática (MPM)

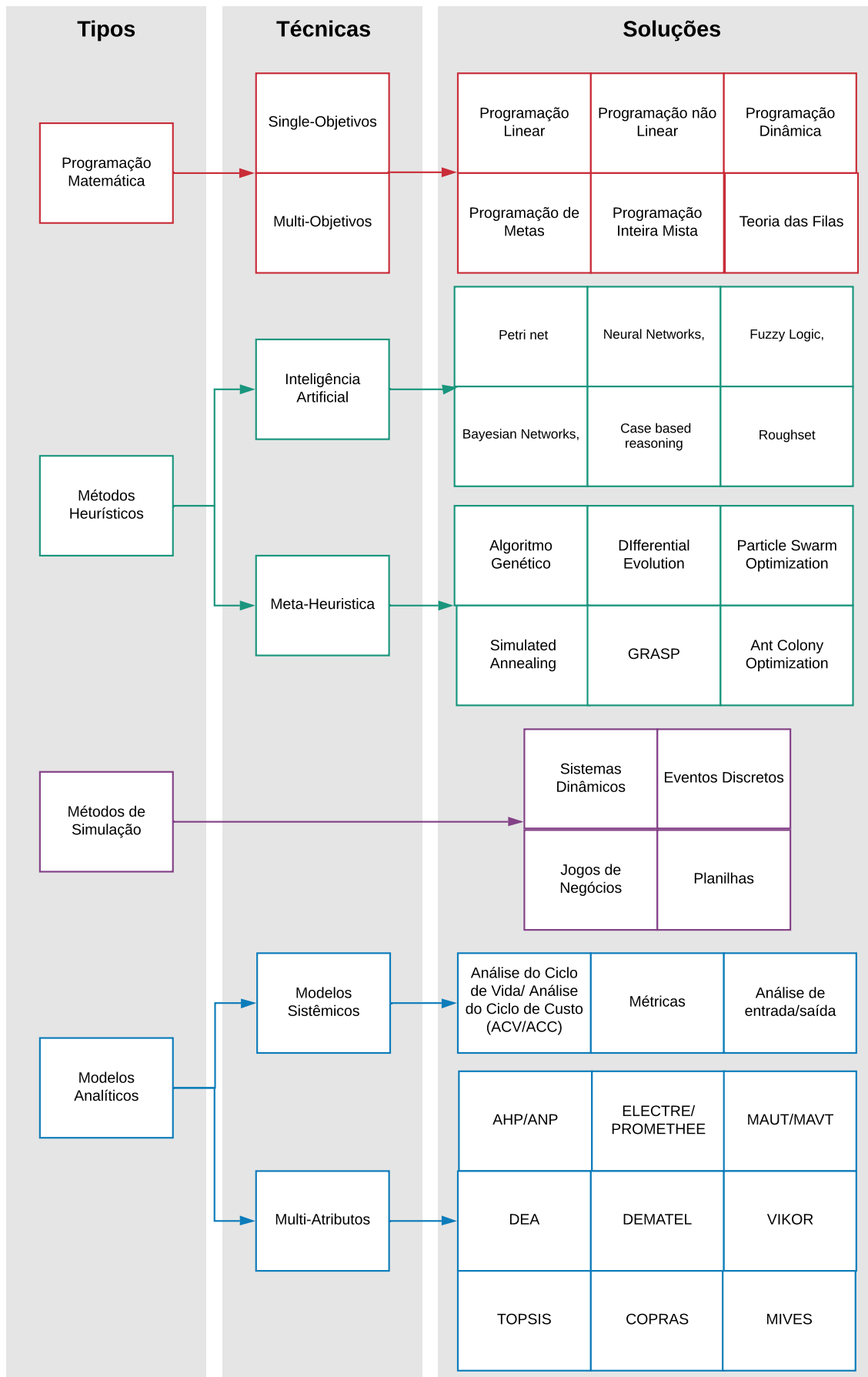
Os Métodos de Programação Matemática têm surgido nos últimos anos como uma técnica na análise da sustentabilidade, uma vez que pode auxiliar no estudo de soluções multicritério com a decisão a partir do balanço de variáveis. Modelos baseados em técnicas multi-objetivo podem lidar com objetivos conflitantes, como custos na cadeia de suprimentos, impactos ambientais e sociais (RODGER; GEORGE, 2017). O MPM pode ser dividido em objetivos simples e objetivos múltiplos. Entre as soluções mais utilizadas encontram-se os modelos de programação linear, não linear, programação inteira mista (MILP), programação de metas, programação dinâmica e teoria das filas (BRANDENBURG; GOVINDAN et al., 2014).

Embora esses métodos tenham provado serem eficazes, eles ainda estão amplamente limitados a problemas com muitas variáveis. Uma limitação desta abordagem é que os modelos matemáticos podem tornar-se cada vez mais complexos, com velocidade significativa. Para garantir que os modelos são matematicamente tratáveis, pressupostos são necessários para relacionar parâmetros, restrições e variáveis de tomada de decisão. Uma maneira possível de superar essa limitação é omitir algumas delas, reduzindo assim a complexidade associada, mas sistemas complexos devem ser simplificados sem prejudicar sua representação (GROSSMANN; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, 2010).

#### 3.1.5.2 Métodos de Simulação (MS)



FIGURA 14 – Abordagens Quantitativas de Avaliação e Otimização



Muitas vezes as soluções utilizando modelos matemáticos não são facilmente determinadas ou são tão limitadas que questões práticas são difíceis de lidar. O uso de modelos de simulação podem fornecer as respostas e o escopo necessário para avaliar ou resolver problemas que não podem ser resolvidos pela programação matemática. A quantidade de técnicas nesta abordagem é mais abrangente do que modelos de programação matemática devido à falta de uma necessidade de obter a melhor solução, mas uma quantidade considerável de boas soluções em diferentes cenários. Muitas dessas técnicas incorporam ferramentas estatísticas e estocásticas em vez de abordagens determinísticas (BRANDENBURG, 2017). Os modelos de simulação são geralmente divididos em: heurística simples, eventos discretos, Sistemas Dinâmicos, planilhas, e Jogos de Negócios (WANG; BRÊME; MOON, 2014). A aleatoriedade das situações práticas torna os modelos de simulação uma direção adequada para a avaliação da sustentabilidade nas cadeias de suprimentos. Os modelos de simulação podem ser bastante simples ou complexos, dependendo da quantidade de parâmetros analisados. Na cadeia de suprimentos de petróleo e gás são bem implementados, alcançando um desempenho aceitável para sua análise.

### **3.1.5.3 Métodos Heurísticos (MH)**

Os Métodos Heurísticos podem ser divididos em Inteligência Artificial e Meta-Heurísticas. Entre as soluções mais utilizadas na inteligência artificial estão as técnicas: Petri net; Case Based Reasoning (CBR); Bayesian Networks (BN); Fuzzy Logic (FL); Neural networks (NN); Rough set (RS). Dentre as soluções de Meta-Heurísticas estão: Genetic Algorithm (GA); Simulated Annealing (SA); Differential Evolution (DE); Particle Swarm Optimization (PSO); Ant colony optimization (ACO); and Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) (ESKANDARPOUR et al., 2015). As técnicas meta-heurísticas podem ser usadas para dar suporte à programação matemática. Muitos modelos híbridos usam programação linear e não linear em conjunto com lógica fuzzy, algoritmo genético entre outras abordagens heurísticas. O modelo oferece uma forma de simplificação e objetividade na programação matemática. Podem apoiar a implementação de modelos de avaliação da cadeia de suprimentos do petróleo e gás (GOVINDAN; JAFARIAN; NOURBAKHS, 2015).

### **3.1.5.4 Modelos Analíticos (MA)**

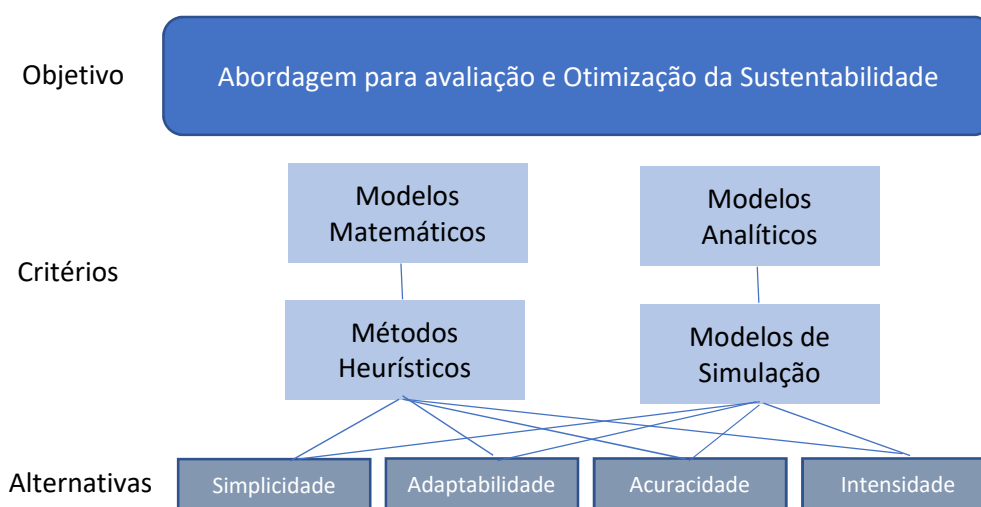
Os Modelos Analíticos são intensamente apropriados para questões de sustentabilidade nas organizações. Pesquisadores estão cada vez mais utilizando e refinando esses modelos. O foco de modelos baseados em MA geralmente não é tanto para alcançar uma situação de equilíbrio quanto para lidar com trade-offs entre atributos conflitantes. Com o modelo existe a possibilidade de ponderar os critérios, o uso de critérios com suas próprias dimensões. Normalmente MA apenas aborda uma parte da cadeia de suprimentos e é baseada em informações de especialistas e partes interessadas, de modo que a ponderação das variáveis é subjetiva (MATTIUSSI; ROSANO; SIMEONI, 2014).

Os modelos analíticos são divididos em Multi-Atributos, Teoria dos Jogos e Modelos Sistêmicos. Muitos modelos MCDM são encontrados na literatura como modelos baseados em AHP / ANP, DEA, TOPSIS, DEMATEL, ELECTRE, MAUT, PROMETHE, entre outros. Os modelos sistêmicos também são amplamente utilizados para a avaliação da sustentabilidade na cadeia de suprimentos, sendo os mais relatados com Análise de Ciclo de Vida (ACV), Métricas e Análises de Entradas/Saídas (ZHANG; HAAPALA, 2015). Em se tratando de métricas, os pesquisadores (CORY SEARCY, 2015), com sua pesquisa de revisão intitulada *“An analysis of metrics use d to measure performance in green and sustainable supply chains”*, dividiu as métricas prospectadas na comunidade científica em: econômicos, ambientais, sociais, voluntários, resiliência, long-term, stakeholders, fluxos, coordenação, relação, valores, eficiência e desempenho. Os indicadores do TBL (Triple Botton Line) são os mais significativos quanto ao aspecto quantitativo, o aspecto ambiental tem a maior quantidade de métricas seguido do aspecto econômico e social

As vantagens dos modelos Multi-Atributos são que é um processo que é transparente e facilmente compreensível pela comunidade local, os objetivos e/ou critérios escolhidos para a análise podem ser analisados e alterados se não atingirem os objetivos da análise e da análise pode fornecer informações importantes para os tomadores de decisão e o resto da comunidade sobre o processo de tomada de decisão (HANAN; BURNLEY; COOKE, 2013). As desvantagens são a ênfase no julgamento da equipe de tomada de decisão, onde a subjetividade pode desempenhar um papel significativo e o fato de que os modelos Multi-Atributos não pode demonstrar que uma decisão cria mais bem-estar humano do que outro, a melhor opção possivelmente pode ser inconsistente com o aumento do bem-estar de uma população, deixando a opção de não fazer nada como sendo preferível (MACHARIS; TURCK SIN; LEBEAU, 2012).

### 3.1.6 ANÁLISE HIERÁRQUICA DOS PROCESSOS

FIGURA 15 – Estrutura da AHP



FONTE: Elaborado pelo autor.

Após a revisão e análise das abordagens do autores mais proeminentes sobre o tema. Esta seção apresenta a análise das abordagens de avaliação e otimização da sustentabilidade através da técnica da Análise Hierárquica dos Processos. Com esta análise será possível identificar e escolher os métodos mais adequados para a avaliação e otimização do desempenho da sustentabilidade organizacional. A referência é o estudo de (BRANDENBURG; GOVINDAN et al., 2014)

Quatro critérios são escolhidos para a análise: Intensidade; Adaptabilidade; Simplicidade; e precisão. A intensidade está relacionada ao escopo e escopo de aplicação dos modelos nas cadeias de suprimentos, bem como à sua aplicação no setor de petróleo e gás dos campos maduros. A adaptabilidade está relacionada à flexibilidade dos modelos em sua adaptabilidade às diferentes cadeias de petróleo e gás de campos maduros. A simplicidade demonstra sua clareza, interface amigável e facilidade de uso do modelo. A precisão está ligada à confiabilidade dos resultados, ao seu grau de sensibilidade e consistência. A seleção desses critérios com base nas pesquisas de Brandenburg, Govindan et al. (2014), Cory Searcy (2015), Eskandarpour et al. (2015). A estrutura da AHP é ilustrada na Figura 15.

A primeira etapa de análise, foi determinar os modelos que possui como característica a intensidade. O resultado demonstrou que os modelos matemáticos são mais intensos, seguidos das alternativas, modelos analíticos, modelos de simulação e métodos heurísticos. A análise de consistência resultou em um valor de 0,04, mostrando que o resultado foi consistente, não sendo necessário ajustar nenhum tipo de

FIGURA 16 – Intensidade

<b>Comparação paritária através das alternativas</b>					
	AM	HM	SM	MPM	
AM	1.00	0.33	0.20	0.14	
HM	3.00	1.00	0.33	0.20	
SM	5.00	3.00	1.00	0.33	
MPM	7.00	5.00	3.00	1.00	
<b>Matriz normalizada</b>				<b>Pesos</b>	
0.0625	0.0357	0.0441	0.0852	AM	0.0569
0.1875	0.1071	0.0735	0.1193	HM	0.1219
0.3125	0.3214	0.2206	0.1989	SM	0.2633
0.4375	0.5357	0.6618	0.5966	MPM	0.5579
<b>CR = 0.04</b>					

FONTE: Elaborado pelo autor.

FIGURA 17 – Adaptabilidade

<b>Comparação paritária através das alternativas</b>					
	AM	HM	SM	MPM	
AM	1.00	5.00	3.00	3.00	
HM	0.20	1.00	0.33	0.33	
SM	0.33	3.00	1.00	0.33	
MPM	0.33	3.00	3.00	1.00	
<b>Matriz normalizada</b>				<b>Pesos</b>	
0.5357	0.4167	0.4091	0.6429	AM	0.5011
0.1071	0.0833	0.0455	0.0714	HM	0.0768
0.1786	0.2500	0.1364	0.0714	SM	0.1591
0.1786	0.2500	0.4091	0.2143	MPM	0.2630
<b>CR=0.07</b>					

FONTE: Elaborado pelo autor.

juízo. De acordo a Figura 16.

A segunda etapa de análise, foi determinar os modelos que possui como característica a adaptabilidade. O resultado demonstrou que os modelos analíticos são mais adaptáveis seguidos dos modelos matemáticos, modelos de simulação e métodos heurísticos. A análise de consistência resultou em um valor de 0,07, mostrando que o resultado foi consistente, sem a necessidade de alterar nenhum tipo de juízo. De acordo com a Figura 17.

A terceira etapa de análise, foi determinar os modelos que possui como característica a simplicidade. De acordo com os juízos foi demonstrado que os modelos analíticos são os mais simples, seguidos dos métodos heurísticos, modelos

FIGURA 18 – Simplicidade

<b>Comparação paritária através das alternativas</b>					
		AM	HM	SM	MPM
AM		1.00	3.00	5.00	5.00
HM		0.33	1.00	3.00	3.00
SM		0.20	0.33	1.00	1.00
MPM		0.20	0.33	1.00	1.00
<b>Matriz normalizada</b>				<b>Pesos</b>	
0.5769	0.6429	0.5000	0.5000	AM	0.5549
0.1923	0.2143	0.3000	0.3000	HM	0.2516
0.1154	0.0714	0.1000	0.1000	SM	0.0967
0.1154	0.0714	0.1000	0.1000	MPM	0.0967
<b>CR = 0.02</b>					

FONTE: Elaborado pelo autor.

FIGURA 19 – Acuracidade

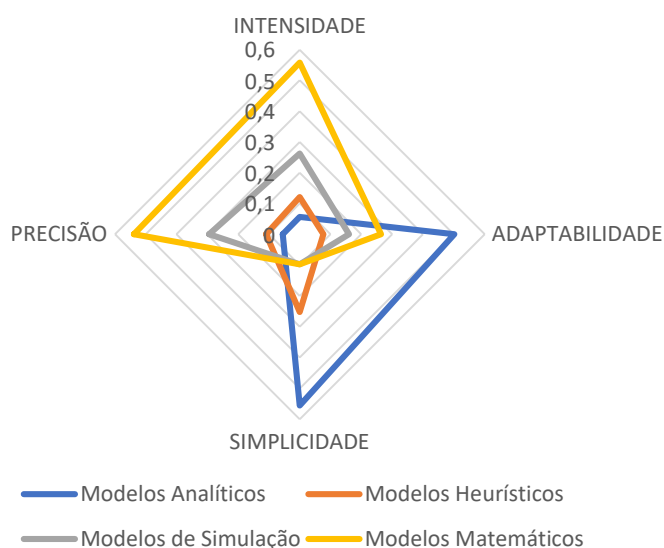
<b>Comparação paritária através das alternativas</b>					
		AM	HM	SM	MPM
AM		1.00	0.33	0.20	0.14
HM		3.00	1.00	0.20	0.20
SM		5.00	5.00	1.00	0.33
MPM		7.00	5.00	3.00	1.00
<b>Matriz normalizada</b>				<b>Pesos</b>	
0.0625	0.0294	0.0455	0.0852	AM	0.0556
0.1875	0.0882	0.0455	0.1193	HM	0.1101
0.3125	0.4412	0.2273	0.1989	SM	0.2950
0.4375	0.4412	0.6818	0.5966	MPM	0.5393
<b>CR = 0.087</b>					

FONTE: Elaborado pelo autor.

matemáticos e de simulação. A análise de consistência resultou em um valor de 0,02, demonstrando que o resultado foi consistente, não sendo necessário alterar nenhum tipo de julgamento. De acordo com a Figura 18.

E por último a quarta etapa de análise, foi determinar os modelos que possui como característica a acuracidade. De acordo com os julgamentos foi demonstrado que os modelos matemáticos tem uma maior acuracidade, seguidos respectivamente pelos modelos de simulação, métodos heurísticos e modelos analíticos. A análise de consistência resultou em um valor de 0,087, mostrando que o resultado foi consistente, não sendo necessário alterar nenhum tipo de julgamento. De acordo com a Figura 19.

FIGURA 20 – Gráfico Radar



FONTE: Elaborado pelo autor.

Na avaliação global das alternativas, a abordagem de modelos matemáticos é a mais adequada para as prioridades estabelecidas e julgadas nesta pesquisa com prioridade de 36,42%, seguidas pelas abordagens baseadas em AM, SM e HM, 29,21%, 20,35% e 14,01%, respectivamente. Essa ordem é mostrada na Tabela 9.

TABELA 9 – Avaliação global da AHP

<b>Crítérios</b>	<b>Intensidade</b>	<b>Adaptabilidade</b>	<b>Simplicidade</b>	<b>Precisão</b>	<b>Média</b>
Modelos Analíticos	0.0569	0.5011	0.5549	0.0556	0.2921
Métodos Heurísticos	0.1219	0.0768	0.2516	0.1101	0.1401
Modelos de Simulação	0.2633	0.1591	0.0967	0.295	0.2035
Modelos Matemáticos	0.5579	0.263	0.0967	0.5393	0.3642

Modelos matemáticos são ineficientes quanto à simplicidade, mas a precisão e a intensidade se destacam das outras abordagens. A abordagem baseada nos modelos analíticos são simples, usando indicadores pré-estabelecidos e dando autonomia à organização para preparar seu próprio relatório, mas peca nos outros critérios. O modelos de simulação tem o nível médio na maioria dos critérios próximos ao métodos heurísticos. A Figura 20 ilustra um gráfico de radar demonstrando a eficiência e a deficiência de cada alternativa. É um resumo de toda a análise conduzida por AHP.

Os resultados demonstraram que os modelos matemáticos são os mais adequados para avaliação e otimização da sustentabilidade organizacional. No entanto, como os resultados foram muito próximos, nota-se que uma combinação de modelos

com diferentes abordagens pode ser interessante. A formulação de um modelo híbrido de avaliação de sustentabilidade usando a modelagem analítica integrando com modelos matemáticos pode proporcionar resultados mais completos e trazer uma eficiência maior para tomada de decisões.

### **3.1.7 CONCLUSÕES**

As organizações estão cada vez mais integrando os princípios da sustentabilidade nas práticas de gerenciamento da cadeia de suprimentos para abordar as implicações econômicas, ambientais e sociais de suas atividades. Este artigo apresentou uma revisão sistemática sobre os modelos multicritérios para avaliação e otimização da sustentabilidade de organizações. Além disso também apresentou uma análise comparativa das abordagens dos métodos de avaliação através da técnica da Análise Hierárquica dos Processos. Esta análise é a ferramenta de validação do modelo proposto e confirmação da hipótese destacada na introdução. Assim a hipótese de que os modelos integrando abordagens analíticas, matemáticas, heurísticas e de simulação são mais completos e adequados para a avaliação e otimização da sustentabilidade na cadeia de suprimentos foram aceitas baseadas no estudo da literatura, julgamento e análise da AHP.

A limitação deste trabalho é justamente na quantidade de pesquisas sobre métodos de avaliação e otimização da sustentabilidade, estudos sobre este tema são recentes. Os modelos que avaliam essas cadeias sustentáveis tornaram-se cada vez mais robustos e complexos, por isso esta pesquisa é de grande importância e tem uma contribuição considerável principalmente na aplicação em organizações de países emergentes. A contribuição deste trabalho é também onde existe o gap da ciência que ainda procura mais respostas sobre a sustentabilidade das organizações. Medindo a sustentabilidade de forma adequada e completa, a proposta de modelo integrado possibilita pesquisas futuras, onde as abordagens analíticas, matemáticas, heurísticas e simulação são destacadas.



### 3.2 ARTIGO 02 - ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS

#### ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS DE TOMADA DE DECISÃO MULTI-CRITÉRIO PARA A PERFORMANCE DA SUSTENTABILIDADE NAS ORGANIZAÇÕES

---

**STATUS** - Previsão de submissão no Journal *Production* (ISSN 1980-5411)

---

**RESUMO** - Estudos sobre a medição e avaliação da sustentabilidade são requisitos fundamentais na gestão sustentável organizacional. A proposta deste artigo é uma análise comparativa dos métodos multi-atributos de tomada de decisão, TOPSIS, VIKOR e PROMETHEE. Esta análise comparativa é realizada através do estudo das abordagens dos artigos que combinam técnicas MCDA e da aplicação dos métodos em uma organização brasileira do setor do petróleo e gás. Os dados de entrada são provenientes dos relatórios de sustentabilidade dos anos de 2009 até 2017. Os resultados demonstraram que os autores mais proeminentes geralmente combinam modelos multi-atributos com o TOPSIS, VIKOR ou PROMETHEE, a fim de atribuir pesos ou combinam os modelos heurísticos para considerar a incerteza do modelo. Os resultados da aplicação dos modelos destacam que os métodos são bem semelhantes no que tange ao ranqueamento das melhores alternativas. Este estudo contribui para a definição e escolha do método para tomada de decisão na sustentabilidade organizacional.

**PALAVRAS-CHAVE:** VIKOR, TOPSIS, PROMETHEE, MCDA, Sistemas de apoio a decisão.

*Comparative analysis of multi criteria decision making techniques for sustainable performance*

**ABSTRACT** - Studies on sustainability measurement and assessment are key requirements in sustainable organizational management. This paper aims is a study with a comparative analysis of the multi-attribute decision making methods, TOPSIS, VIKOR and PROMETHEE. This comparative analysis is performed by studying the approaches of the articles that combine and integrate MCDA techniques and also by applying the methods in a Brazilian organization of the oil and gas sector. Input data come from sustainability reports from 2009 to 2017. Results showed that the most prominent authors generally combine multi-attribute models with TOPSIS, VIKOR or PROMETHEE to assign weights or combine heuristic models to consider. the uncertainty of the model. The results of the application of the models highlight that the methods are very similar regarding the ranking of the best alternatives. This study contributes as the definition and choice of the method for decision making in organizational sustainability.

**KEYWORDS:** VIKOR; TOPSIS; PROMETHEE; MCDA; Decision Support System.

### 3.2.1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade vem das palavras "sustentar" e "habilidade", o termo parece ter vindo a significar "a capacidade de manter", nas últimas décadas, ele provavelmente tem sido aplicado com mais frequência a um tipo de desenvolvimento social humano aplicado no desenvolvimento sustentável. A sustentabilidade pode também significar a capacidade de suportar e adaptar-se, levando à questão de quais as condições existentes precisam e devem ser mantidas. Em muitas pesquisas, o termo desenvolvimento sustentável tem sido interpretado como "satisfação das necessidades humanas do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações humanas" (WCED, 1987). Porém, este conceito tem sido criticado por vários autores, por não ser suficientemente específico sobre quais necessidades devem ser abordadas em primeiro lugar (STARIK; KANASHIRO, 2013).

Os negócios globais, bem como a sociedade em geral, estão em meio a uma das mudanças mais significativas desde a revolução da informação da década de 1990. A revolução da sustentabilidade, ou seja, o movimento de indivíduos, organizações e sociedades para desenvolver a capacidade de melhoria da qualidade de vida ambiental e socioeconômica em longo prazo (STARIK; KANASHIRO, 2013).

O desenvolvimento sustentável globalmente está sendo estruturado como o parâmetro principal para moldar futuro da sociedade. As práticas devem ser orientadas pelos desafios ambientais, sociais, políticos ou econômicos, ou seja, os critérios da sustentabilidade. Existem dezenas de definições que não se convergem a um único conceito, por exemplo, as definições dos defensores da sustentabilidade ambiental voltada para resiliência e vulnerabilidade, sustentabilidade econômica, sustentabilidade social (THIELE, 2013).

Pesquisas enfatizam que a gestão ambiental nas cadeias de suprimentos é uma das quatro questões-chave para a difusão da sustentabilidade organizacional (Nações Unidas, 2013b). Não só os problemas de sustentabilidade ambiental são uma preocupação, mas questões crescentes relacionadas à sustentabilidade social vêm ganhando bastante importância (SARKIS; ZHU; LAI, 2011). Não existe um consenso na definição de cadeias verdes e sustentáveis. Cory Searcy (2015) apresentam uma revisão bibliográfica com 22 definições para cadeias verdes e 12 definições para cadeias sustentáveis.

Aplicação de princípios de gestão ambiental a todo o conjunto de atividades da cadeia de suprimentos, incluindo concepção, aquisição, fabricação e montagem, embalagem, logística e distribuição (HANDFIELD; NICOLS, 1999).

Um novo e importante modelo para que as organizações alcancem os objeti-

vos reduzindo os riscos de impactos ambientais, aumentando simultaneamente a sua eficiência ecológica (ZHU Q.; GENG, 2005).

Integração dos aspectos ambientais na gestão da cadeia de suprimentos, incluindo a concepção do produto, a seleção dos materiais, os processos de fabricação, a entrega do produto final aos consumidores e a gestão da logística reversa (SRIVASTAVA, 2007).

Integração das preocupações ambientais nas práticas organizacionais da gestão da cadeia de suprimentos, incluindo logística reversa (SARKIS; ZHU; LAI, 2011).

A Sustentabilidade tem sido considerada como uma preocupação crescente no design da cadeia de suprimentos e na seleção de fornecedores (GOVINDAN; AZEVEDO et al., 2014). Pesquisadores como Shukla, Deshmukh e Kanda (2009) reforçaram que a gestão da cadeia de suprimentos não deve ser tomada apenas a partir de parâmetros econômicos, incorporando os parâmetros ambientais e sociais na gestão da cadeia de suprimentos, surgindo assim o conceito de cadeias verdes.

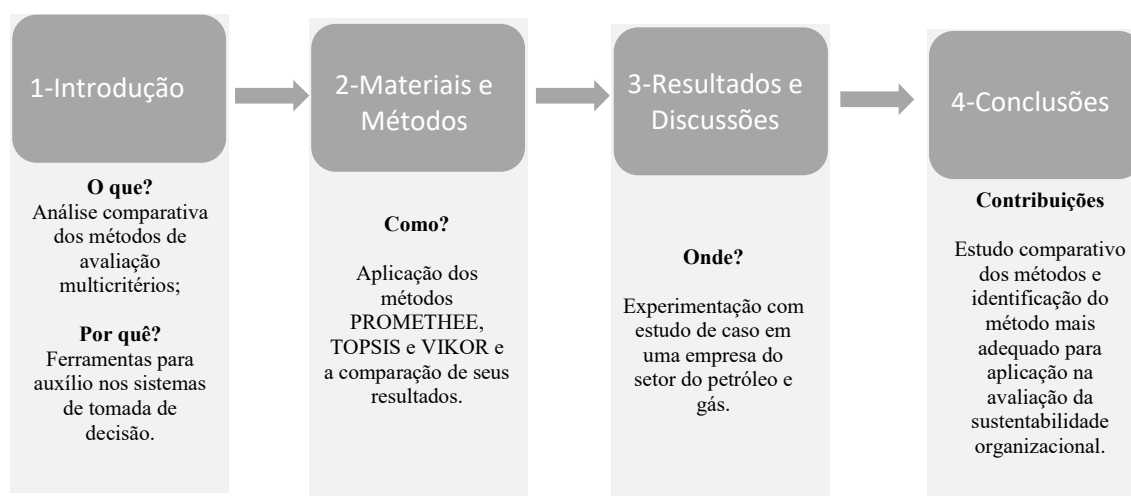
A gestão de cadeias sustentáveis tem como definição a integração estratégica e transparente da organização com a realização de objetivos sociais, ambientais e econômicos coordenando sistemicamente os principais processos de negócios para melhorar o desempenho econômico de longo prazo da empresa individual e sua cadeia de suprimentos (CARTER; ROGERS; CHOI, 2015). Também tem como conceito a gestão de fluxos de materiais, de informação e de capitais, bem como a cooperação entre os agentes ao longo da cadeia de suprimentos, levando em consideração os objetivos das três dimensões do desenvolvimento sustentável: econômico, ambiental e social (SEURING; MÜLLER, 2008)

Existe a necessidade então de se avaliar o desempenho das organizações quanto a sua sustentabilidade. Esta avaliação não é simples, uma vez que a sustentabilidade incorpora parâmetros de múltiplos critérios, alguns complexos no caminho do desenvolvimento sustentável. A partir dos resultados da avaliação de desempenho obtida, as organizações podem atuar na melhor tomada de decisão usando critérios sustentáveis (FARLEY; SMITH, 2013).

Algumas abordagens quantitativas para avaliação e otimização da sustentabilidade são identificadas por (BRANDENBURG; GOVINDAN et al., 2014). Entre eles estão os modelos analíticos, matemáticos, heurísticos e de simulação. Diante disso é necessário estudar mais sobre o tema, suas inter-relações e identificar os métodos e modelos mais adequados para auxiliar na tomada de decisões.

Assim o principal objetivo deste trabalho é estudar os métodos multicritérios através de uma análise comparativa e experimentação dos modelos multiatributos. O escopo desta pesquisa está ilustrada na Figura 21.

FIGURA 21 – Escopo do Artigo.



### 3.2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados os métodos *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS); *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations* (PROMETHEE) e *VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje* (VIKOR).

#### 3.2.2.1 *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS)

O TOPSIS é um método multicritério desenvolvido originalmente por (HWANG C.L.; YOON, 1981). É um método de agregação que compara um conjunto de alternativas, identificando pesos para cada critério, normalizando as pontuações para cada critério e calculando a distância geométrica entre cada alternativa e a alternativa ideal, que é a melhor pontuação em cada critério. O método é realizado de acordo com as seguintes etapas:

Etapa 01 - Criação da matriz de avaliação

Composta por m alternativas em critérios, com a interseção de cada alternativa

e critério dados como  $x_{ij}$  portanto, temos uma matriz  $(x_{ij})_{m \times n}$ .

Etapa 02 - Normalização da matriz

A matriz  $(x_{ij})_{m \times n}$  é então normalizada usando o método:

$$r_{ij} = \left( \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}} \right), i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \quad (3.3)$$

Etapa 03 - Atribuição dos pesos

$$t_{ij} = r_{ij} \cdot w_j, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, \text{ onde } W_j / \sum_{k=1}^n W_k, j = 1, 2, \dots, n, \text{ que } \sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (3.4)$$

e  $W_j$  é o valor original do peso do indicador  $v_j, j = 1, 2, \dots, n$ .

Etapa 04 - Determinação da melhor e pior alternativa

$$A_w = (\max(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m | j \in J_-), (\min(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m | j \in J_+) \equiv t_{wj} | j = 1, 2, \dots, n, \quad (3.5)$$

$$A_b = (\min(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m | j \in J_-), (\max(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m | j \in J_+) \equiv t_{bj} | j = 1, 2, \dots, n, \quad (3.6)$$

$J_+ = j = 1, 2, \dots, n, |j$  está associado ao impacto positivo do critério e,

$J_- = j = 1, 2, \dots, n, |j$  está associado ao impacto negativo do critério

Etapa 05 - Cálculo do desvio entre a alternativa com a pior condição

$$d_{iw} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{wj})^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3.7)$$

Cálculo do desvio entre a alternativa com a melhor condição,

$$d_{ib} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{bj})^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3.8)$$

Etapa 06 - Cálculo da similaridade com a pior condição

$$s_{iw} = \frac{d_{iw}}{d_{iw} - d_{ib}}, 0 \leq s_{iw} \leq 1, i = 1, 2, \dots, m. \quad (3.9)$$

$s_{iw} = 1$  se e somente se a solução alternativa tiver as melhores condições; e  $s_{iw} = 0$  se e somente se a solução alternativa tiver as piores condições;

Etapa 07 - Ranqueamento das alternativas

$$s_{iw} \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

### 3.2.2.2 Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations(PROMETHEE)

Método de tomada de decisão multicritério. Os elementos básicos do método foram introduzidos pela primeira vez pelo professor Jean-Pierre Brans em 1982. O PROMETHEE I classifica as alternativas parcialmente através dos fluxos  $\Phi^+$  e  $\Phi^-$  e o PROMETHEE II classifica as alternativas globalmente através do fluxo  $\Phi$ . Etapas para o método PROMETHEE são a determinação de desvios com base na comparação por paridade; aplicação da função de preferência; cálculo de um índice de preferência global ou global; cálculo a classificação parcial do PROMETHEE I e a classificação completa do PROMETHEE II. Os passos são dados abaixo.

Etapa 01 - Determinação dos desvios baseados na comparação paritária.

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b) \quad (3.10)$$

Onde  $d_j(a, b)$  significa a diferença entre as avaliações de a e b quanto aos critérios estabelecidos.

Etapa 02 - Aplicação da matriz de preferência.

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)]_{j = 1, \dots, k} \quad (3.11)$$

Onde  $P_j(a, b)$  significa a preferência da alternativa A e B para o critério estabelecido em função de  $d_j(a, b)$ .

Etapa 03 - Cálculo do índice de preferência global.

$$\forall a, b \in A; \pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)w_j \quad (3.12)$$

Etapa 04 - Cálculo dos fluxos individuais (PROMETHEE I).

$$\phi^+(a) = 1/(n-1) \sum_{X \in A} X \in A \quad (3.13)$$

$$\phi^-(a) = 1/(n-1) \sum_{X \in A} X \in A \quad (3.14)$$

Onde  $\phi^+(a), \phi^-(a)$  significa fluxos positivos e fluxos negativos, respectivamente, para cada alternativa.

Etapa 05 - Cálculo dos fluxos globais (PROMETHEE II).

$$\phi(a) = [\phi^+(a)] - [\phi^-(a)], \quad (3.15)$$

Onde  $\phi(a)$  significa o fluxo global para cada alternativa.

### 3.2.2.3 *VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje* (VIKOR)

É um método de tomada de decisão com múltiplos critérios. Foi originalmente desenvolvido por Serafim Opricovic (1980) para resolver problemas conflitantes e incommensuráveis (unidades diferentes). O tomador de decisão deseja uma solução que seja a mais próxima do ideal e as alternativas sejam avaliadas de acordo com a todos os critérios estabelecidos. O VIKOR classifica alternativas e determina a solução denominada compromisso que é a mais próxima do ideal.

Etapa 01 - Determine os melhores e piores valores dos critérios

$$i = 1, 2, \dots, n; F_i^* = \max(F_{ij}, j = 1, \dots, J), F_i^- = \min(F_{ij}, j = 1, \dots, J). \quad (3.16)$$



$$i = 1, 2, \dots, n; F_i^* = \min(F_{ij}, j = 1, \dots, J), F_i^- = \max(F_{ij}, j = 1, \dots, J). \quad (3.17)$$

Etapa 02 - Cálculo da matriz normalizada

$$S_i e R_i, i = 1, 2, \dots, J$$

$$S_i = \sum_{j=1}^m W_j * \left( \frac{x_i^+ - X_{ij}}{X_i^+ - X_i^-} \right) \quad (3.18)$$

$$R_i = \max W_j * \left( \frac{x_i^+ - X_{ij}}{X_i^+ - X_i^-} \right) \quad (3.19)$$

onde  $W_i$  são os pesos dos critérios, expressando a preferência da matriz como a importância relativa dos critérios

Etapa 03 - Cálculo dos valores finais

$$Q_i = v * \left( \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} \right) + (1 - v) * \left( \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \right) \quad (3.20)$$

Etapa 04 - Classificação das alternativas pelo  $S_i$ ,  $R_i$  ou  $Q_i$ .

### 3. ANÁLISE COMPARATIVA

#### 3.2.3 ABORDAGENS DOS AUTORES

Métodos combinados com VIKOR foram relatados em 7 trabalhos. A combinação VIKOR e AHP bastante comum foi relatada no artigo de Ren e Lützen (2015). A combinação da lógica fuzzy com VIKOR também é proeminente e foi destacada no artigo de Rostamzadeh et al. (2015) na seleção de gestores nas cadeia de suprimentos verdes. Deng et al. (2018) relatou que VIKOR modificado foi utilizado, onde a solução de max/min tradicional foi substituído pelo nível de aspiração e pelo pior valor, a

fim de evitar escolher o melhor entre opções. O método foi combinado com DEMATEL e ANP a fim de avaliar a sustentabilidade de organizações de contabilidade de TAIWAN. Na pesquisa de Lu et al. (2018) o método VIKOR foi utilizado para medir a sustentabilidade dos aeroportos usando o mesmo princípio de VIKOR modificado com DEMATEL e ANP. No artigo de Mousavi-Nasab e Sotoudeh-Anvari (2018), foi relatado que o método VIKOR pode trazer problemas de reversão na classificação e seleção de materiais. Já no trabalho de Liu et al. (2019) o método VIKOR foi integrado com *interval-valued intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers* (IVITFNs) para classificação e seleção de fornecedores.

Sobre o TOPSIS destacam-se 13 trabalhos. No artigo de Awasthi, Chauhan e Omrani (2011) foram combinados ao TOPSIS a lógica fuzzy para avaliação e seleção da melhor alternativa para sistemas de transporte com poucas informações ou sob incertezas. A metodologia empregada no artigo de Sreekumar e Mohan (2018) combina o TOPSIS com a AHP e SOWIA para identificar a melhor estratégia para melhorar o desempenho da sustentabilidade. Govindan, Khodaverdi e Jafarian (2013) relatam que a combinação da lógica fuzzy com TOPSIS foi utilizada para selecionar fornecedores, seguindo os parâmetros sustentáveis. Já no outro artigo de Govindan, Shankar e Kannan (2016) integraram os métodos DEMATEL, ANP e TOPSIS para escolha e avaliação do melhor material para construção sustentável. Esta combinação de Fuzzi-TOPSIS está empregada também nos artigos de Wang, Xu et al. (2017), Mahjouri et al. (2017), Onu et al. (2017) e Solangi et al. (2019). Por fim o modelo apresentado por Mohammed et al. (2018) trás uma proposta de combinação do AHP, Fuzzy e TOPSIS integrado com um modelo multiobjetivo para minimização e maximização dos resultados.

A proposta de combinação de método de avaliação multi-atributo com multi-objetivo também é proposta de Vivas et al. (2019), os autores integraram as técnicas AHP, PROMETHEE e Programação de Metas para avaliação e otimização do desempenho da sustentabilidade de uma organização do setor do petróleo e gás.

### 3.2.4 ESTUDO DE CASO

A aplicação dos métodos PROMETHEE, VIKOR e TOPSIS são realizadas de acordo com os dados de entrada provenientes de uma grande empresa de petróleo e gás. A maior empresa do setor no Brasil, possui cerca de 300.000 funcionários diretos e indiretos, produzindo uma média de 2680 mil boed (barris de petróleo equivalente por dia). Os dados coletados são de relatórios de sustentabilidade divulgados pela empresa a cada ano. O desempenho é analisado com os dados de 2009 a 2017.

### 3.2.4.1 Seleção dos indicadores

As métricas desta pesquisa estão baseadas nos estudos da (GRI, 2018). Esta base de indicadores foi escolhida porque é o que a empresa do setor do petróleo e gás utiliza pra desenvolver seus relatórios anuais de sustentabilidade e de gestão integrada. Foram identificados cerca de 20 indicadores quantitativos para composição dos dados de entrada do modelo de avaliação multi-atributos. As métricas selecionadas estão ilustradas nas Tabela 10.

TABELA 10 – Indicadores selecionados pelo GRI

Dimensão	Tema	Indicadores	
1	Econômico	Desempenho econômico	Endividamento (milhões)
2	Econômico	Desempenho econômico	Volume de Produção (boed)
3	Econômico	Desempenho econômico	Margem Líquida
4	Econômico	Desempenho econômico	Receita (milhões)
5	Econômico	Desempenho econômico	Investimentos totais (milhões)
6	Ambiental	Biodiversidade	Áreas Protegidas (un)
7	Ambiental	Efluentes	Vazamentos de óleos (m <sup>3</sup> )
8	Ambiental	Resíduos	Resíduos Perigosos (tons)
9	Ambiental	Energia	Consumo de Energia (Tj)
10	Ambiental	Água	Consumo de água (milhões m <sup>3</sup> )
11	Ambiental	Emissões	Emissões de CO <sup>2</sup> (ton)
12	Ambiental/Social	Comunidades locais	Projetos sócio-ambientais (un)
13	Social	Diversidade	Empregados mulheres (%)
14	Social	Diversidade	Empregados negros(%)
15	Social	Igualdade	Chefes mulheres(%)
16	Social	Igualdade	Chefes negros(%)
Social	Igualdade	Relação maior/menor salário (min max)	
18	Social	Saúde e Segurança do trabalho	taxa de acidentes fatais
19	Social	Saúde e Segurança do trabalho	quantidade de acidentes (un)
20	Social	Trabalho	Empregos totais (un)

TABELA 11 – Parâmetros de Entrada. Parte A

Year	Receita	Endividamento	M. Líquida	Vol. Produção	T. Investimentos	Energia	Vazamentos	Emissões	Resíduos
2009	182834	73400	16	2526	70757	604070	254	57,8	258
2010	211842	61007	17	2583	76411	716673	668	61,1	277
2011	244176	103022	14	2622	72546	682827	234	56,2	285
2012	281379	147817	8	2598	84137	936199	387	68	261
2013	304890	221563	8	2540,3	104416	1050949	187	74,2	260
2014	337260	282089	-6	2670	87140	1155220	69,5	81,4	234
2015	321638	391962	-11	2787	76315	1155185	71,6	78,1	195
2016	282589	314120	-5	2790	55348	899487	51,9	66,5	132
2017	283695	280752	-1	2767	48219	947645	35,8	67	114

TABELA 12 – Parâmetros de Entrada. Parte B

Anos	A. Protegidas	Projetos	Água	E. Mulheres	E. Negros	C. Mulheres	C. Negros	R. Salário	Acidentes f.	N. Acidentes	Empregos T.
2009	16	1230	176	16,4	13,8	13,63	29,94	24,98	0,81	420	372179
2010	16	1770	187,3	16,6	20,4	13,3	25,3	22,41	1,08	485	372098
2011	16	1900	190,9	16,9	22,5	14,4	24,9	20,22	1,66	653	410051
2012	16	1500	193,4	17,1	23,7	15	24,6	20,54	1,32	6729	445437
2013	169	1600	193,6	16,7	24,3	15,4	25,2	30,8	0,4	5465	446288
2014	481	1461	206,5	16,8	24,7	15,2	24,4	30,3	1,1	4406	371982
2015	459	1512	213,3	17,45	25,61	15,3	25,3	32	2,15	3096	236546
2016	1211	750	191,6	16,18	27	15,2	20,6	32	1,63	2347,2	186353
2017	989	375	177,7	16,2	27,6	15,3	17,4	32	1,08	1555,2	179904

## 3.2.4.2 Aplicação do TOPSIS

TABELA 13 – Resultados do TOPSIS. Parte A

Year	Receita	Endividamento	M. Líquida	Vol. Produção	T. Investimentos	Energia	Vazamentos	Emissões	Resíduos
2009	0,0110	0,0052	0,0247	0,0159	0,0154	0,0109	0,0145	0,0141	0,0186
2010	0,0128	0,0043	0,0262	0,0162	0,0166	0,0129	0,0382	0,0149	0,0199
2011	0,0147	0,0073	0,0216	0,0165	0,0158	0,0123	0,0134	0,0137	0,0205
2012	0,0170	0,0104	0,0123	0,0163	0,0183	0,0169	0,0221	0,0166	0,0188
2013	0,0184	0,0156	0,0123	0,0159	0,0227	0,0189	0,0107	0,0181	0,0187
2014	0,0203	0,0199	-0,0092	0,0168	0,0189	0,0208	0,0040	0,0199	0,0168
2015	0,0194	0,0277	-0,0170	0,0175	0,0166	0,0208	0,0041	0,0191	0,0140
2016	0,0170	0,0222	-0,0077	0,0175	0,0120	0,0162	0,0030	0,0162	0,0095
2017	0,0171	0,0198	-0,0015	0,0174	0,0105	0,0171	0,0020	0,0163	0,0082
V+	0,0203	0,0043	0,0262	0,0175	0,0227	0,0109	0,0020	0,0137	0,0082
V-	0,0110	0,0277	-0,0170	0,0159	0,0105	0,0208	0,0382	0,0199	0,0205

TABELA 14 – Resultados do TOPSIS. Parte B

Anos	A. Protegidas	Projetos	Água	E. Mulheres	E. Negros	C. Mulheres	C. Negros	R. Salário	Acidentes f.	N. Acidentes	Empregos T.
2009	0,0110	0,0052	0,0247	0,0159	0,0154	0,0109	0,0145	0,0141	0,0186	0,0000	0,0144
2010	0,0128	0,0043	0,0262	0,0162	0,0166	0,0129	0,0382	0,0149	0,0199	0,0000	0,0208
2011	0,0147	0,0073	0,0216	0,0165	0,0158	0,0123	0,0134	0,0137	0,0205	0,0000	0,0223
2012	0,0170	0,0104	0,0123	0,0163	0,0183	0,0169	0,0221	0,0166	0,0188	0,0005	0,0176
2013	0,0184	0,0156	0,0123	0,0159	0,0227	0,0189	0,0107	0,0181	0,0187	0,0049	0,0188
2014	0,0203	0,0199	-0,0092	0,0168	0,0189	0,0208	0,0040	0,0199	0,0168	0,0141	0,0171
2015	0,0194	0,0277	-0,0170	0,0175	0,0166	0,0208	0,0041	0,0191	0,0140	0,0134	0,0177
2016	0,0170	0,0222	-0,0077	0,0175	0,0120	0,0162	0,0030	0,0162	0,0095	0,0355	0,0088
2017	0,0171	0,0198	-0,0015	0,0174	0,0105	0,0171	0,0020	0,0163	0,0082	0,0290	0,0044
V+	0,0203	0,0043	0,0262	0,0175	0,0227	0,0109	0,0020	0,0137	0,0082	0,0355	0,0223
V-	0,0110	0,0277	-0,0170	0,0159	0,0105	0,0208	0,0382	0,0199	0,0205	0,0000	0,0044

TABELA 15 – Ranqueamento do TOPSIS

Anos	Si+	Si-	Pi	Rank
2009	0,0433	0,0664	0,6051	1
2010	0,0542	0,0634	0,5392	6
2011	0,0439	0,0639	0,5927	2
2012	0,0557	0,0459	0,4518	8
2013	0,0465	0,0545	0,5394	5
2014	0,0521	0,0478	0,4785	7
2015	0,0626	0,0456	0,4213	9
2016	0,0488	0,0583	0,5445	4
2017	0,0443	0,0595	0,5732	3

## 3.2.4.3 Aplicação do VIKOR

TABELA 16 – Resultados do VIKOR. Parte A

Year	Receita	Endividamento	M. Líquida	Vol. Produção	T. Investimentos	Energia	Vazamentos	Emissões	Resíduos
2009	0,0500	0,0019	0,0018	0,0500	0,0299	0,0000	0,0173	0,0032	0,0421
2010	0,0406	0,0000	0,0000	0,0392	0,0249	0,0102	0,0500	0,0097	0,0477
2011	0,0301	0,0063	0,0054	0,0318	0,0284	0,0071	0,0157	0,0000	0,0500
2012	0,0181	0,0131	0,0161	0,0364	0,0180	0,0301	0,0278	0,0234	0,0430
2013	0,0105	0,0243	0,0161	0,0473	0,0000	0,0405	0,0120	0,0357	0,0427
2014	0,0000	0,0334	0,0411	0,0227	0,0154	0,0500	0,0027	0,0500	0,0351
2015	0,0051	0,0500	0,0500	0,0006	0,0250	0,0500	0,0028	0,0435	0,0237
2016	0,0177	0,0382	0,0393	0,0000	0,0437	0,0268	0,0013	0,0204	0,0053
2017	0,0173	0,0332	0,0321	0,0044	0,0500	0,0312	0,0000	0,0214	0,0000
best(xi+)	337260	61007	17	2790	104416	604070	35,8	56,2	114
worst(xi-)	182834	391962	-11	2526	48219	1155220	668	81,4	285

TABELA 17 – Resultados do VIKOR. Parte B

Anos	A. Protegidas	Projetos	Água	E. Mulheres	E. Negros	C. Mulheres	C. Negros	R. Salário	Acidentes f.	N. Acidentes	Empregos T.
2009	0,0500	0,0019	0,0018	0,0500	0,0299	0,0000	0,0173	0,0032	0,0421	0,0500	0,0220
2010	0,0406	0,0000	0,0000	0,0392	0,0249	0,0102	0,0500	0,0097	0,0477	0,0500	0,0043
2011	0,0301	0,0063	0,0054	0,0318	0,0284	0,0071	0,0157	0,0000	0,0500	0,0500	0,0000
2012	0,0181	0,0131	0,0161	0,0364	0,0180	0,0301	0,0278	0,0234	0,0430	0,0500	0,0131
2013	0,0105	0,0243	0,0161	0,0473	0,0000	0,0405	0,0120	0,0357	0,0427	0,0436	0,0098
2014	0,0000	0,0334	0,0411	0,0227	0,0154	0,0500	0,0027	0,0500	0,0351	0,0305	0,0144
2015	0,0051	0,0500	0,0500	0,0006	0,0250	0,0500	0,0028	0,0435	0,0237	0,0315	0,0127
2016	0,0177	0,0382	0,0393	0,0000	0,0437	0,0268	0,0013	0,0204	0,0053	0,0000	0,0377
2017	0,0173	0,0332	0,0321	0,0044	0,0500	0,0312	0,0000	0,0214	0,0000	0,0093	0,0500
best(xi+)	1211	1900	176	17,45	27,6	15,4	29,94	20,22	0,4	420	446288
worst(xi-)	16	375	213,3	16,18	13,8	13,3	17,4	32	2,15	6729	179904

TABELA 18 – Ranqueamento do Vikor

Anos	Si	Ri	Qi	Rank
2009	0,4474	0,0500	-0,0043	3
2010	0,4630	0,0500	-0,0035	5
2011	0,3735	0,0500	-0,0079	1
2012	0,4490	0,0500	-0,0042	4
2013	0,4513	0,0473	-0,0054	2
2014	0,5074	0,0500	-0,0013	9
2015	0,5334	0,0500	0,0000	8
2016	0,4947	0,0500	-0,0019	7
2017	0,4812	0,0500	-0,0026	6



## 3.2.4.4 Aplicação do PROMETHEE

TABELA 19 – Resultados do PROMETHEE: Parte A

Year	Receita	Endividamento	M. Líquida	Vol. Produção	T. Investimentos	Energia	Vazamentos	Emissões	Resíduos
2009	-0.8090	0.5937	0.7500	-0.6487	-0.5000	0.5768	0.0771	0.4090	-0.3696
2010	-0.5911	0.6392	1.0000	-0.4045	0.2500	0.3638	-0.9313	0.2842	-0.4389
2011	-0.2816	0.4707	0.5000	-0.2037	-0.2500	0.4358	0.1081	0.4740	-0.4735
2012	0.0915	0.2829	0.1250	-0.3359	0.5000	-0.0873	-0.2853	0.0152	-0.3804
2013	0.3163	-0.0620	0.1250	-0.5874	1.0000	-0.2835	0.1387	-0.2677	-0.3767
2014	0.5901	-0.3475	-0.7500	0.1047	0.7500	-0.4438	0.2060	-0.5809	-0.1352
2015	0.4655	-0.7460	-1.0000	0.7135	0	-0.4438	0.2038	-0.4628	0.4242
2016	0.1036	-0.4898	-0.5000	0.7242	-0.7500	-0.0051	0.2288	0.0811	0.8750
2017	0.1147	-0.3412	-0.2500	0.6378	-1.0000	-0.1129	0.2542	0.0558	0.8750

TABELA 20 – Resultados do PROMETHEE: Parte B

Anos	A. Protegidas	Projetos	Água	E. Mulheres	E. Negros	C. Mulheres	C. Negros	R. Salário	Acidentes f.	N. Acidentes	Empregos T.
2009	-0.2893	-0.2346	0.5022	-0.0268	-1.0000	-0.3138	0.8304	0.2580	0.7500	0.4970	0.3343
2010	-0.2893	0.5394	0.1917	-0.0121	-0.5606	-0.4232	0.1543	0.5500	0.2121	0.4842	0.3340
2011	-0.2893	0.7834	0.0849	0.0146	-0.1836	-0.0500	0.1286	0.7168	-0.6122	0.4510	0.3750
2012	-0.2809	0.1376	-0.0009	0.0371	0.0389	0.1023	0.1120	0.6989	-0.1863	-0.7864	0.4200
2013	-0.2358	0.2819	-0.0077	-0.0068	0.1252	0.1518	0.1466	-0.3903	1.0000	-0.5932	0.4241
2014	-0.0311	0.0875	-0.4928	0.0038	0.1837	0.1270	0.0914	-0.3443	0.2037	-0.3579	0.3334
2015	-0.0655	0.1549	-0.7678	0.1006	0.3168	0.1394	0.1543	-0.4963	-0.9832	-0.0668	-0.7200
2016	0.8055	-0.7746	0.0609	-0.0570	0.5044	0.1270	-0.6552	-0.4963	-0.5963	0.0995	-0.7500
2017	0.6756	-0.9754	0.4293	-0.0533	0.5751	0.1394	-0.9624	-0.4963	0.2121	0.2728	-0.7500

TABELA 21 – Ranqueamento do PROMETHEE

<b>Year</b>	<b>Phi+</b>	<b>Phi-</b>	<b>Phi</b>	<b>RANK</b>
2009	0.3279	0.2815	0.0464	4
2010	0.3194	0.2423	0.0770	2
2011	0.3100	0.2058	0.1042	1
2012	0.2444	0.2240	0.0204	5
2013	0.2565	0.2038	0.0528	3
2014	0.2354	0.2688	-0.0334	6
2015	0.2151	0.3633	-0.1482	9
2016	0.2497	0.3260	-0.0762	8
2017	0.2675	0.3105	-0.0430	7

Os resultados dos três métodos possuem grandes similaridades, principalmente quando se tratam das melhores alternativas e das piores alternativas. Pode-se observar na Tabela 22 os anos de 2009 e 2011 foram os que tiveram melhores resultados nas avaliações multicritérios. Os anos 2015 e 2014 foram os anos que tiveram piores desempenhos da sustentabilidade organizacional.

TABELA 22 – Comparativos dos ranqueamentos

Year	TOPSIS	VIKOR	PROMETHEE	MÉDIA
2009	1	3	4	2,66 (2)
2010	6	5	2	4,33 (4)
2011	2	1	1	1,33 (1)
2012	8	4	5	5,66 (6)
2013	5	2	3	3,33 (3)
2014	7	9	6	7,33 (8)
2015	9	8	9	8,66 (9)
2016	4	7	8	6,33 (7)
2017	3	6	7	5,33 (5)

Embora os métodos analisados possuam similaridades trazendo resultados próximos, o PROMETHEE é mais útil onde grupos de pessoas estão trabalhando em problemas complexos, especialmente aqueles com vários critérios múltiplos, envolvendo muitas percepções e julgamentos humanos, cujas decisões são longas. impacto a longo prazo. Possui vantagens únicas quando é difícil quantificar ou comparar elementos importantes da decisão ou quando a colaboração entre departamentos ou membros da equipe é restringida por suas diferentes especializações ou perspectivas.

O software PROMETHEE e Gaia possui uma abordagem descritiva, denominada Gaia, que permite ao tomador de decisão visualizar as principais características de um problema de decisão: ele é capaz de identificar facilmente conflitos ou sinergias entre critérios, identificar grupos de ações e destacar desempenhos notáveis (BRANS; MARESCHAL, 2005). Também possui uma abordagem prescritiva, que fornece ao tomador de decisão o ranqueamento das soluções encontradas (BRANS; VINCKE, 1985).

O método PROMETHEE foi utilizado com sucesso em muitos contextos de tomada de decisão em todo o mundo. Uma lista não exaustiva de publicações científicas sobre extensões, aplicações e discussões relacionadas ao método foi publicada em 2010 (BEHZADIAN et al., 2010).

### 3.2.5 Conclusões

Este artigo apresenta uma análise comparativa dos métodos multicritérios, bem como realiza uma análise sobre as combinações dos métodos para avaliação e otimização do desempenho da sustentabilidade de organizações. Os métodos analisados e comparados foram os três métodos outrankings VIKOR, PROMETHEE e TOPSIS. Os principais resultados desta pesquisa estão resumidos a seguir:

- O TOPSIS é o mais proeminente entre os três métodos.
- Os métodos foram construídos na mesma época, décadas de 80/90.
- Os resultados gerados são semelhantes.
- A visualização do software PROMETHEE Gaia é um fator importante na escolha entre os três métodos.

Reconhecemos que toda pesquisa tem suas próprias limitações e este artigo não é exceção. Esta pesquisa foi baseada principalmente em julgamentos qualitativos e na análise de trabalhos mais proeminentes prospectados na base de dados Science Direct e SCOPUS.

Assim artigos não abordados podem trazer conclusões diferentes. Finalmente, este estudo se concentrou apenas na análise da sustentabilidade de uma organização do setor do petróleo e gás.

Pesquisas futuras podem explorar a mesma metodologia dentro de uma geografia diferente em outros tipos de organizações e/ou locais para descobrir a eficiência dos métodos estudados.

### 3.3 ARTIGO 03 - PRIMEIRA APLICAÇÃO DO MODELO HÍBRIDO

#### MEDIÇÃO DO DESEMPENHO DA SUSTENTABILIDADE COM MODELO MULTICRITÉRIO: UM ESTUDO DE CASO

---

**STATUS** - Aceito no Journal *Sustainability* (ISSN 2071-1050). *Impact Factor: 2.592*

---

**RESUMO** - A proposta desta pesquisa é o desenvolvimento de um modelo híbrido de análise de decisão multicritério (MCDA) para medição do desempenho da sustentabilidade. O modelo é aplicado a uma empresa brasileira de petróleo e gás e é construído a partir do *Preference ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE), usando 20 indicadores das dimensões da sustentabilidade. Na análise estatística, são utilizadas as técnicas Análise de Componentes Principais (PCA) e Regressão Linear Múltipla (MLR). Os resultados do PROMETHEE mostraram que o melhor desempenho de sustentabilidade da empresa foi em 2011 e 2010 e os piores anos foram em 2015 e 2016. A aplicação da técnica PCA visa eliminar a multicolinearidade existente e capturar a direção da variabilidade dos indicadores. O primeiro PC com 53,2%, o segundo PC com 25,6%. Uma estimativa baseada na equação MLR foi realizada. A análise do desempenho de sustentabilidade da empresa por meio de modelos de múltiplos critérios não é nova, mas sua combinação com modelos matemáticos, comparando os relatórios de sustentabilidade por ano, traz resultados mais completos sobre o desempenho da sustentabilidade organizacional.

**PALAVRAS-CHAVE:** Multi critério, Multi atributo, Multi objetivo, sustentabilidade, desempenho.

*MEASURING SUSTAINABILITY PERFORMANCE WITH MULTICRITERIA MO-DELO: A CASE STUDY*

**ABSTRACT** The proposal of this research is the development of a hybrid multicriteria decision analysis (MCDA) model to measure sustainability performance. The model is applied to a Brazilian oil and gas company and is built from the Preference ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE) using 20 indicators of sustainability dimensions. Statistical analysis uses the Principal Component Analysis (PCA) and Multiple Linear Regression (MLR) techniques. PROMETHEE results showed that the company's best sustainability performance was in 2011 and 2010 and the worst years were in 2015 and 2016. The application of the PCA technique aims to eliminate existing multicollinearity and capture the direction of indicator variability. The first PC with 53.2 %, the second PC with 25.6 %. An estimate based on the MLR equation was performed. The analysis of the company's sustainability performance using multi-criteria models is not new, but its combination with mathematical models, comparing sustainability reports by year, yields more complete results on organizational sustainability performance.

**KEYWORDS:** sustainability performance; MCDA; MCDM; PROMETHEE; PCA; MLR

### 3.3.1 INTRODUÇÃO

A definição mais popular da sustentabilidade foi apresentada pela Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento em 1987 como: "Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades". A sustentabilidade busca garantir que os recursos disponíveis hoje não são utilizados para privar os benefícios econômicos, ambientais e sociais das gerações futuras (CORY SEARCY, 2015).

Diante da necessidade de avaliação da sustentabilidade, pesquisadores e profissionais desenvolvem sistemas de avaliação que acompanham o progresso da sustentabilidade ao longo do tempo (PANAGIOTAKOPOULOS; ESPINOSA; WALKER, 2015). A maior dificuldade para a avaliação da sustentabilidade é a integração de vários critérios em várias dimensões, com muitos critérios conflitantes entre si. A sustentabilidade tem sido o foco da maioria das iniciativas e inovações organizacionais (FAHIMNIA; JABBARZADEH, 2016).

Embora haja avanços nas práticas e teorias que contribuem para a sustentabilidade das organizações, a questão ainda está longe de amadurecer (KIRCHOFF; OMAR; FUGATE, 2016). Muitos esforços foram direcionados para o desenvolvimento de indicadores na medição, prevenção e classificação da sustentabilidade. Esses indicadores fornecem uma forma padronizada de dados para a tomada de decisão. No entanto, apenas indicadores podem não ser suficientes para medir o desenvolvimento sustentável. Muitos desses indicadores de sustentabilidade foram propostos e adotados na prática, mas a maioria deles se concentra apenas na classificação das organizações (AFFUL-DADZIE; AFFUL-DADZIE; TURKSON, 2016).

As empresas precisam integrar técnicas que levem em consideração as dimensões sociais e ambientais, não apenas a dimensão econômica das técnicas tradicionais de minimização de custos. Assim, as decisões de sustentabilidade estão se tornando cada vez mais parte integrante da tomada de decisões nos negócios (DEMARTINI et al., 2017). As dimensões estudadas na sustentabilidade influenciam todas as organizações constituintes de uma cadeia de suprimentos, não apenas uma organização ou empresa focal. Tebaldi, Bigliardi e Bottani (2018) e Gong et al. (2019) em seus artigos relataram que as pesquisas sobre inovação, sustentabilidade e cadeia de suprimentos sustentável estão crescendo, demonstrando a relevância de pesquisas relacionadas à medição do desempenho da sustentabilidade corporativa. A agregação desses indicadores é realizada por meio de modelos e técnicas de diferentes abordagens. Como exemplo, tem-se modelos analíticos, métodos de programação matemática, modelos de simu-

lação, métodos heurísticos e uma combinação de dois ou mais em modelos híbridos (BRANDENBURG; GOVINDAN et al., 2014).

Muitos modelos atualmente projetados são insuficientes para uma avaliação completa da sustentabilidade, como modelos baseados apenas em parâmetros ambientais ou modelos que funcionam apenas com variáveis determinísticas. A falta de modelos mais abrangentes para medir a sustentabilidade levou ao desenvolvimento de muitos métodos diferentes, resultando em estruturas incompletas e soluções parciais (MURA et al., 2018). Existe uma lacuna de pesquisa quando se trata do desenvolvimento de modelos de avaliação e otimização da sustentabilidade. É necessário criar modelos híbridos que ofereçam resultados completos para os sistemas de suporte à decisão das empresas (BRANDENBURG, 2017).

Um sistema de suporte à decisão (DSS) é definido como uma ferramenta baseada em software que auxilia o processo de tomada de decisão de maneira integrada com os processos de gerenciamento da empresa (MATTIUSI; ROSANO; SIMEONI, 2014). Os modelos analíticos são os mais utilizados para análise de sustentabilidade nas organizações. O foco dos modelos analíticos é o estudo de critérios conflitantes. Normalmente, não visa o equilíbrio entre os parâmetros. Os modelos analíticos são divididos em auxílio à decisão multicritério (MCDA), teoria dos jogos e modelos sistêmicos (MARTTUNEN; LIENERT; BELTON, 2017). Alguns modelos de MCDA são destacados na literatura, como os modelos baseados na Análise Hierárquica dos Processos (AHP) e Análise de processos em rede (ANP), Análise Envoltória de Dados (DEA), *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), *Elimination and Chox Traduisant la Réalité* (ELECTRE), *Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT), *Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory* (DEMATEL) e *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE) (LEKSONO; SUPARNO; VANANY, 2019). Outros autores combinam modelos multicritério com modelos heurísticos, como autores que usaram o DEMATEL combinado com a lógica difusa para avaliar a sustentabilidade de pequenas e médias empresas (WU et al., 2019).

O método PROMETHEE foi desenvolvido na década de 1980 por J.P. Brans e B. Mareschal. O PROMETHEE é um método que auxilia na tomada de decisões nos setores empresariais e instituições governamentais. Ele quantifica os critérios e seus conflitos, destacando as principais alternativas para alcançar esses objetivos (BEHZADIAN et al., 2010). O método é amplamente utilizado para avaliações com vários critérios e tem uma forte aplicação em sustentabilidade. Destaca-se dos outros métodos ao lidar com a incerteza e pelo software Visual Gaia PROMETHEE, onde oferece ferramentas visuais, além de ter alta praticidade nas reavaliações (CINELLI; COLES; KIRWAN, 2014).

Sendo assim, o principal objetivo deste artigo é o desenvolvimento e um mo-



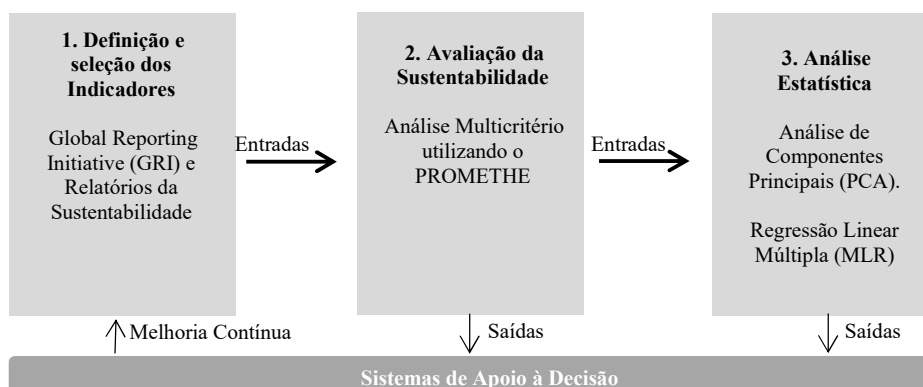


FIGURA 22 – Escopo do Artigo

delo híbrido integrando modelo multiatributo com modelo multiobjetivos.

### 3.3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta é a combinação do PROMETHEE, uma ferramenta MCDA, com as técnicas estatísticas PCA e MLR para análise do desempenho da sustentabilidade de uma empresa brasileira de petróleo e gás. O escopo é mostrado na Figura 22 e apresentado em três etapas.

#### 3.3.2.1 DEFINIÇÃO E SELEÇÃO DOS INDICADORES

Os indicadores são selecionados na Global Reporting Initiative (GRI). Segundo Vivas et al. (2019) os indicadores mais importantes e consolidados para relato da sustentabilidade. Com base nos relatórios de sustentabilidade da empresa, foram identificados cerca de 60 indicadores-chave, dos quais 20 foram escolhidos para a avaliação, 5 econômicos, 7 ambientais e 8 sociais. D'Eusano, Zamagni e Petti (2019) relataram em seu artigo que indicadores sociais são frequentemente usados para avaliar o desempenho da sustentabilidade dos processos de produção. Hutchins e Sutherland (2008) sugeriram o uso de indicadores sociais quantificáveis, como equidade e segurança no trabalho, na medição da sustentabilidade.

#### 3.3.2.2 PROCESSO DE AVALIAÇÃO

A avaliação do desempenho de sustentabilidade da empresa brasileira de petróleo e gás é realizada através da modelagem de múltiplos critérios com a técnica PROMETHEE. Na terceira etapa, técnicas de análise estatística com análise de componentes principais e regressão linear múltipla. PROMETHEE consiste em uma matriz com um conjunto de possíveis alternativas ou ações(A). No caso deste artigo, as alternativas são anos. O desempenho de sustentabilidade da empresa obtido no PROMETHEE é comparado em uma escala de tempo anual (2009 a 2017). Para essas alternativas, existem os critérios que são avaliados a partir de sua função F(a). O PROMETHEE I classifica as alternativas parcialmente através dos fluxos  $\Phi^+$  e  $\Phi^-$  e o PROMETHEE II classifica as alternativas globalmente através do fluxo  $\Phi$ . Etapas para o método PROMETHEE são a determinação de desvios com base na comparação por paridade; aplicação da função de preferência; cálculo de um índice de preferência global ou global; cálculo a classificação parcial do PROMETHEE I e a classificação completa do PROMETHEE II. Os passos são dados abaixo.

$$\forall a, b \in A; \pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)w_j \quad (3.21)$$

$$\phi^+(a) = 1/(n-1) \sum_{X \in A} X \in A \quad (3.22)$$

$$\phi^-(a) = 1/(n-1) \sum_{X \in A} X \in A \quad (3.23)$$

onde  $\phi^+(a), \phi^-(a)$  denota os fluxos positivos e negativos respectivamente.

$$\phi(a) = [\phi^+(a)] - [\phi^-(a)], \quad (3.24)$$

onde  $\phi$  denota os fluxos globais.

### 3.3.2.3 TESTE DE SENSIBILIDADE

Um teste de sensibilidade é realizado a partir da alteração dos dados de entrada. O teste estuda o efeito que a variação de um dado de entrada pode ter sobre os resultados. Métodos para análise de sensibilidade são divididos em matemáticos, estatísticos e gráficos. Os métodos estatísticos envolvem simulações com variações de entradas e análise dos resultados do efeito (CHRISTOPHER FREY; PATIL, 2002).

### 3.3.2.4 ANALISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

A Análise de Componentes Principais (PCA) é uma técnica estatística multivariada que busca capturar informações sobre a estrutura de correlação linear para variáveis de grupo correlacionadas (RENCHEER, 2002). Esta informação é condensada em um número menor de variáveis não correlacionadas, chamadas componentes principais (PCs), que representam as projeções das variáveis originais em novos eixos ortogonais.

Sendo  $X_{n \times k}$  uma matriz de conjunto de dados centrada em  $k$  variáveis correlacionadas, onde cada linha contém uma observação variante  $k$ , representada por  $x'_{j1xp}$ . A estrutura de correlação da matriz  $X$  é obtida na matriz de co-variância de amostra (ou correlações)  $S_{k \times k}$ . Como essa matriz é simétrica e não singular, existe uma matriz ortogonal  $U_{k \times k}$  que diagonaliza  $S$ . Assim, temos  $U'SU = S_c$ , onde  $S_c$  é uma matriz diagonal que contém os valores próprios de  $k$   $\lambda_t$  valores positivos para  $S$ . A matriz  $U$  apresenta em suas colunas os  $k$  auto-vetores  $u_t$  que carregam as cargas da combinação linear para projetar as variáveis originais no  $t^{th}$  eixo ortogonal fornecido pelo PC  $t^{th}$ , para  $t=1, \dots, k$ . O vetor próprio  $\lambda_t$  descreve a variação do  $t^{th}$ . O vetor  $z_{t(n \times 1)}$  traz as pontuações para o PC  $t^{th}$  das  $n$  observações iniciais, obtidas através de  $z_t = Xu_t$ , para  $t= 1, \dots, l$ . Considerando que cada variável segue uma distribuição Normal, o PC  $t^{th}$  segue uma distribuição Normal com média 0 e variação  $\lambda_t$ .

A projeção de uma nova observação  $k$  variada pelo vetor  $x(k \times 1)$ , em eixos ortogonais definidos pelos PCs, é obtida por  $z = U'x$ , Onde  $z = [z_1, z_2, \dots, z_w]$  é o vetor que contém as pontuações  $w$  para as novas observações; a matriz  $U = [u_1|u_2|\dots|u_w]$  contém em suas colunas os vetores próprios associados e  $U'$  representam sua transposição (MARCONDES; SANT'ANNA, 2015).

### 3.3.2.5 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

A regressão linear múltipla (MLR) é uma generalização da regressão linear simples quando há mais de uma variável independente. O modelo básico para regressão linear múltipla é:

$$\gamma_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_p X_{ip} + \epsilon_i \quad (3.25)$$

para cada observação  $i = 1, \dots, n$ .

O valor  $n$  são as observações de uma variável dependente e as variáveis independentes. Onde  $\gamma_i$  é a  $i$ - observação da variável dependente,  $X_{ij}$  ocorre com a

observação da variável independente  $j, j = 1, 2, \dots, p$ . Os valores  $\beta_j$  são os parâmetros a serem estimados e  $\epsilon_i$  é o  $i$ -ésimo erro normal distribuído de forma idêntica. Na regressão linear multivariada, existe uma equação para cada uma das variáveis dependentes  $m > 1$  que compartilham o mesmo conjunto de variáveis independentes e, portanto, são estimadas simultaneamente (CHRISTENSEN, 2011).

### 3.3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo de caso é realizado em uma grande empresa do setor do petróleo e gás. Principal produtor, distribuidor e vendedor de petróleo e gás, a empresa possui mais de 150 mil funcionários. A empresa que por sua vez tem capital aberto divulga seus relatórios gerenciais anualmente. A partir dos relatórios de sustentabilidade foram coletadas as informações essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa. A seção apresenta o desenvolvimento com resultados da avaliação do PROMETHEE, PCA e MLR.

#### 3.3.3.1 SELEÇÃO DOS INDICADORES

As métricas desta pesquisa estão baseadas nos estudos da (GRI, 2018). Esta base de indicadores foi escolhida porque é o que a empresa do setor do petróleo e gás utiliza para desenvolver seus relatórios anuais de sustentabilidade e de gestão integrada. Foram identificados cerca de 57 indicadores quantitativos para composição dos dados de entrada do modelo de avaliação multi-atributos. As métricas selecionadas estão ilustradas na Tabela 23.

TABELA 23 – Indicadores selecionados pelo GRI

Dimensão	Tema	Indicadores
Econômico	Desempenho econômico	$X_1$ = Endividamento (milhões)
Econômico	Desempenho econômico	$X_2$ = Volume de Produção (boed)
Econômico	Desempenho econômico	$X_3$ = Margem Líquida
Econômico	Desempenho econômico	$X_4$ = Receita (milhões)
Econômico	Desempenho econômico	$X_5$ = Investimentos totais (milhões)
Ambiental	Biodiversidade	$X_6$ = Áreas Protegidas (un)
Ambiental	Efluentes	$X_7$ = Vazamentos de óleos ( $m^3$ )
Ambiental	Resíduos	$X_8$ = Resíduos Perigosos (tons)
Ambiental	Energia	$X_9$ = Consumo de Energia (Tj)
Ambiental	Água	$X_{10}$ = Consumo de água (milhões $m^3$ )
Ambiental	Emissões	$X_{11}$ = Emissões de $CO_2$ (ton)
Ambiental/Social	Comunidades locais	$X_{12}$ = Projetos sócio-ambientais (un)
Social	Diversidade	$X_{13}$ = Empregados mulheres (%)
Social	Diversidade	$X_{14}$ = Empregados negros (%)
Social	Igualdade	$X_{15}$ = Chefes mulheres (%)
Social	Igualdade	$X_{16}$ = Chefes negros (%)
Social	Igualdade	$X_{17}$ = Relação maior/menor salário (min max)
Social	Saúde e Segurança do trabalho	$X_{18}$ = taxa de acidentes fatais
Social	Saúde e Segurança do trabalho	$X_{19}$ = quantidade de acidentes (un)
Social	Trabalho	$X_{20}$ = Empregos totais (un)

Os 20 critérios selecionados no PROMETHEE, através das bases dos indicadores de sustentabilidade, determinam as funções de cada uma delas de preferência e o objetivo de cada critério na maximização ou minimização. Observa-se que as funções de preferência utilizadas são a forma v e a função linear. A Tabela 24 mostra as entradas do PROMETHEE.

TABELA 24 – Entradas do PROMETHEE

<b>Cr�terios</b>	<b>Max/Min</b>	<b>Fun�o de prefer�ncia</b>	<b>-Q</b>	<b>-P</b>
X <sub>1</sub>	Min	V-Shape	na	238,519.30
X <sub>2</sub>	Max	V-Shape	na	175.07
X <sub>3</sub>	Max	V-Shape	na	0.25
X <sub>4</sub>	Max	V-Shape	na	112,185.10
X <sub>5</sub>	Max	Linear	9480	24.50
X <sub>6</sub>	Max	Linear	394.620	874.43
X <sub>7</sub>	Min	Linear	174.060	411.51
X <sub>8</sub>	Min	Linear	25.530	59.72
X <sub>9</sub>	Min	Linear	171,956.900	451,237.10
X <sub>10</sub>	Min	Linear	9.480	24.05
X <sub>11</sub>	Min	Linear	7.210	19.52
X <sub>12</sub>	Max	Linear	166.330	426.14
X <sub>13</sub>	Max	Linear	0.030	0.25
X <sub>14</sub>	Max	Linear	0.030	0.25
X <sub>15</sub>	Max	Linear	0.030	0.25
X <sub>16</sub>	Max	Linear	0.030	0.25
X <sub>17</sub>	Min	V-Shape	na	9.90
X <sub>18</sub>	Min	Linear	0.025	0.25
X <sub>19</sub>	Min	V-Shape	na	5062.90
X <sub>20</sub>	Max	Linear	64,052.400	141,584.70

### 3.3.3.2 ANÁLISE COM O PROMETHEE

A partir dos indicadores seleccionados os dados para análise foram definidas e parametrizadas. Avaliando de acordo com o método PROMETHEE, foram gerados fluxos individuais (Phi – e Phi +) e fluxos globais (Phi). De acordo com os resultados do Phi, um ranking foi realizado como o resultado final da avalia o. Como mostrado na Tabela 25. Os resultados mostraram que a empresa teve o melhor desempenho em 2011 e o pior desempenho no ano de 2015. A partir do ranking pode-se inferir que os resultados podem estar relacionados a dois índices externos, preço do petróleo e taxa de câmbio. Para esse entendimento, uma análise de correla o de múltiplos cr terios   realizada usando a técnica PCA.

TABELA 25 – Fluxos individuais e fluxos globais

<b>Year</b>	<b>Phi+</b>	<b>Phi–</b>	<b>Phi</b>
2011	0.3100	0.2058	0.1042
2010	0.3194	0.2423	0.0770
2013	0.2565	0.2038	0.0528
2009	0.3279	0.2815	0.0464
2012	0.2444	0.2240	0.0204
2014	0.2354	0.2688	–0.0334
2017	0.2675	0.3105	–0.0430
2016	0.2497	0.3260	–0.0762
2015	0.2151	0.3633	–0.1482

### 3.3.3.3 TESTE DE SENSIBILIDADE

É realizado um teste de sensibilidade do modelo em relação aos dados de entrada, com base em duas modificações. A primeira modificação é baseada no número de indicadores. O segundo é baseado nos pesos dos indicadores.

Em um primeiro teste, 3 indicadores foram removidos 2 indicadores sociais (total de empregos e acidentes) 1 indicador ambiental (projetos). Em um segundo teste, mais 1 indicador ambiental e 1 social (acidentes fatais) foram removidos, equilibrando o número de indicadores com 5 econômicos, 5 ambientais e 5 sociais

Com o primeiro teste de sensibilidade, pode-se observar que a mudança no número de indicadores não resulta significativamente nos resultados do ranking. O ranking mantém o primeiro lugar do ano de 2011 e o último lugar do ano de 2015, não houve mudanças significativas no posicionamento de outros anos. Demonstrado na Tabela 26.

TABELA 26 – Teste de Sensibilidade: Quantidade de Indicadores

<b>Ano</b>	<b>Phi 20 Indicadores</b>	<b>Phi 17 Indicadores</b>	<b>Phi 15 Indicadores</b>
2011	0.1042	0.0834	0.0920
2010	0.0770	0.0621	0.0284
2013	0.0528	0.0720	0.0204
2009	0.0464	0.0409	0.0070
2012	0.0204	–0.0148	0.0645
2014	–0.0334	–0.0362	–0.0559
2017	–0.0430	–0.0267	–0.0226
2016	–0.0762	–0.0721	–0.0330
2015	–0.1482	–0.1086	–0.1009

No segundo teste de sensibilidade, os pesos relativos aos indicadores foram alterados. Inicialmente, foram inseridos pesos iguais a todos indicadores. Em seguida, pesos maiores foram adicionados aos indicadores econômicos (50 %) e ambientais (35 %) e os pesos sociais (15 %) diminuídos. Ver Tabela 27.

TABELA 27 – Teste de Sensibilidade: Pesos das dimensões.

<b>Ano</b>	<b>Phi 33% all</b>	<b>Phi Pesos Iguais</b>	<b>Phi 50%, 35%, 15%</b>
2011	0.1042	0.1100	0.0955
2010	0.0770	0.0676	0.0892
2013	0.0528	0.0449	0.0577
2009	0.0464	0.0693	-0.0030
2012	0.0204	0.0109	0.0304
2014	-0.0334	-0.0405	-0.0307
2017	-0.0430	-0.0350	-0.0437
2016	-0.0762	-0.0732	-0.0617
2015	-0.1482	-0.1540	-0.1337

Com o segundo teste de sensibilidade, pode-se observar que a mudança nos pesos dos indicadores não resulta significativamente nos resultados da classificação. O ranking mantém o primeiro lugar do ano de 2011 e o último lugar do ano de 2015, não houve mudanças significativas no posicionamento de outros anos.

#### 3.3.3.4 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

A Correlação de Pearson demonstra o nível de correlação entre os critérios individuais, mostrados na Tabela 28 e 29. A correlação está destacada nas cores em vermelho que demonstra uma correlação negativa e azul que demonstra uma correlação positivo. A intensidade da cor indica se a correlação é alta, média ou baixa. Esses dados são mostrados na Figura 23.

Com o coeficiente de correlação de Pearson de 0,829, pode-se inferir que a equação linear múltipla é uma técnica adequada para prever valores futuros do desempenho da sustentabilidade a partir dos parâmetros dos fluxos globais gerados no PROMETHEE. A partir desses resultados pode ser realizada uma previsão com regressão linear múltipla tendo como variável dependente os fluxos globais e variáveis independentes a taxa de câmbio e o preço do petróleo.

A aplicação da técnica Análise de Componentes Principais visa eliminar a multicolinearidade existente e capturar a direção da variabilidade dos indicadores. A



técnica permite obter PCs principais dos componentes principais ortogonais, formando uma combinação linear distinta dos indicadores originais. Os autovetores de PC representam a carga e a direção da variabilidade nos indicadores. PCs está listado em Tabela 30.

Com a estrutura de gráfico biplot, ilustrado na Figura 24, pode-se verificar uma divisão entre dois PCs. No PC1 com 53,2 % de Áreas Protegidas, Resíduos Perigosos, Volume de Produção, Dívida Líquida, Empregadas Negras, Chefes Femininas, Margem Líquida, Vendas, Empregadas Femininas. No PC2, com 25,6 %, Investimentos totais, Consumo de energia, Consumo de água, Emissões de CO<sup>2</sup>, Projetos socioambientais, Chefes negros, Relação salarial, Taxa de acidentes fatais, Número de acidentes, Total de empregos. Isso mostra em que nível de correlação os indicadores têm entre si.

TABELA 28 – Fluxos individuais: Parte A

Year	Receita	Endividamento	M. Líquida	Vol. Produção	T. Investimentos	Energia	Vazamentos	Emissões	Resíduos
2009	-0.8090	0.5937	0.7500	-0.6487	-0.5000	0.5768	0.0771	0.4090	-0.3696
2010	-0.5911	0.6392	1.0000	-0.4045	0.2500	0.3638	-0.9313	0.2842	-0.4389
2011	-0.2816	0.4707	0.5000	-0.2037	-0.2500	0.4358	0.1081	0.4740	-0.4735
2012	0.0915	0.2829	0.1250	-0.3359	0.5000	-0.0873	-0.2853	0.0152	-0.3804
2013	0.3163	-0.0620	0.1250	-0.5874	1.0000	-0.2835	0.1387	-0.2677	-0.3767
2014	0.5901	-0.3475	-0.7500	0.1047	0.7500	-0.4438	0.2060	-0.5809	-0.1352
2015	0.4655	-0.7460	-1.0000	0.7135	0	-0.4438	0.2038	-0.4628	0.4242
2016	0.1036	-0.4898	-0.5000	0.7242	-0.7500	-0.0051	0.2288	0.0811	0.8750
2017	0.1147	-0.3412	-0.2500	0.6378	-1.0000	-0.1129	0.2542	0.0558	0.8750

TABELA 29 – Fluxos Individuais: Parte B

Anos	A. Protegidas	Projetos	Água	E. Mulheres	E. Negros	C. Mulheres	C. Negros	R. Salário	Acidentes f.	N. Acidentes	Empregos T.
2009	-0.2893	-0.2346	0.5022	-0.0268	-1.0000	-0.3138	0.8304	0.2580	0.7500	0.4970	0.3343
2010	-0.2893	0.5394	0.1917	-0.0121	-0.5606	-0.4232	0.1543	0.5500	0.2121	0.4842	0.3340
2011	-0.2893	0.7834	0.0849	0.0146	-0.1836	-0.0500	0.1286	0.7168	-0.6122	0.4510	0.3750
2012	-0.2809	0.1376	-0.0009	0.0371	0.0389	0.1023	0.1120	0.6989	-0.1863	-0.7864	0.4200
2013	-0.2358	0.2819	-0.0077	-0.0068	0.1252	0.1518	0.1466	-0.3903	1.0000	-0.5932	0.4241
2014	-0.0311	0.0875	-0.4928	0.0038	0.1837	0.1270	0.0914	-0.3443	0.2037	-0.3579	0.3334
2015	-0.0655	0.1549	-0.7678	0.1006	0.3168	0.1394	0.1543	-0.4963	-0.9832	-0.0668	-0.7200
2016	0.8055	-0.7746	0.0609	-0.0570	0.5044	0.1270	-0.6552	-0.4963	-0.5963	0.0995	-0.7500
2017	0.6756	-0.9754	0.4293	-0.0533	0.5751	0.1394	-0.9624	-0.4963	0.2121	0.2728	-0.7500

Pearson's	Sales R.	Net Debt	Net Margin	Vol. Prod.	Total Invest.	Energy	Oil Leaks	Emissions	Haz. Waste	Prot. Areas	Projects	Feme Empl.	Water	Black Empl.	Fem. Heads	B. Bosses	Wage Rel.	% Fatal Accidents	N. Accidents	Jobs	Oil Price	Ex. rate
Sales R.	-	-0.84	-0.885	0.54	0.364	-0.967	0.512	-0.897	0.396	0.305	-0.146	0.345	-0.744	0.835	0.9	-0.406	-0.65	-0.257	-0.699	-0.335	0.096	0.522
Net Debt	-0.84	-	0.961	-0.84	0.097	0.836	-0.64	0.758	-0.776	-0.634	0.493	-0.182	0.619	-0.85	-0.8	0.554	0.879	0.395	0.335	0.757	0.445	-0.89
Net Margin	-0.89	0.961	-	-0.789	0	0.859	-0.65	0.808	-0.656	-0.508	0.389	-0.314	0.727	-0.802	-0.823	0.431	0.762	0.461	0.427	0.63	0.305	-0.78
V. Production	0.54	-0.84	-0.789	-	-0.514	-0.5	0.469	-0.37	0.918	0.801	-0.58	0.036	-0.382	0.785	0.562	-0.736	-0.654	-0.661	0.075	-0.926	-0.65	0.912
T. Investments	0.364	0.097	0	-0.514	-	-0.409	-0.27	-0.523	-0.646	-0.648	0.645	0.443	-0.485	-0.095	0.106	0.463	0.133	0.314	-0.695	0.663	0.741	-0.49
Energy	-0.97	0.836	0.859	-0.5	-0.409	-	-0.41	0.954	-0.39	-0.263	0.182	-0.374	0.739	-0.768	-0.817	0.345	0.691	0.152	0.718	0.345	-0.01	-0.54
Oil Leaks	0.512	-0.64	-0.654	0.469	-0.272	-0.405	-	-0.353	0.496	0.45	-0.458	-0.041	-0.213	0.506	0.704	-0.264	-0.643	-0.126	-0.146	-0.435	-0.22	0.554
Emissions	-0.9	0.758	0.808	-0.37	-0.523	0.954	-0.35	-	-0.238	-0.098	0.067	-0.425	0.806	-0.571	-0.66	0.113	0.663	0.054	0.669	0.203	-0.03	-0.43
Haz. Waste	0.396	-0.78	-0.656	0.918	-0.646	-0.39	0.496	-0.238	-	0.938	-0.828	-0.263	-0.074	0.732	0.507	-0.806	-0.739	-0.393	0.118	-0.964	-0.78	0.958
Prot. Areas	0.305	-0.63	-0.508	0.801	-0.648	-0.263	0.45	-0.098	0.938	-	-0.863	-0.54	0.129	0.698	0.457	-0.88	-0.656	-0.249	0.135	-0.828	-0.67	0.834
Projects	-0.15	0.493	0.389	-0.58	0.645	0.182	-0.46	0.067	-0.828	-0.863	-	0.569	-0.31	-0.451	-0.336	0.639	0.616	-0.055	-0.073	0.705	0.715	-0.74
Feme Empl.	0.345	-0.18	-0.314	0.036	0.443	-0.374	-0.04	-0.425	-0.263	-0.54	0.569	-	-0.764	0.024	0.181	0.426	0.137	-0.477	-0.353	0.077	0.244	-0.06
Water	-0.74	0.619	0.727	-0.382	-0.485	0.739	-0.21	0.806	-0.074	0.129	-0.31	-0.764	-	-0.412	-0.487	-0.095	0.342	0.502	0.469	0.156	-0.1	-0.29
Black Empl.	0.835	-0.85	-0.802	0.785	-0.095	-0.768	0.506	-0.571	0.732	0.698	-0.451	0.024	-0.412	-	0.888	-0.82	-0.662	-0.408	-0.423	-0.659	-0.18	0.738
Fem. Heads	0.9	-0.8	-0.823	0.562	0.106	-0.817	0.704	-0.66	0.507	0.457	-0.336	0.181	-0.487	0.888	-	-0.531	-0.609	-0.278	-0.658	-0.426	0.051	0.582
B. Bosses	-0.41	0.554	0.431	-0.736	0.463	0.345	-0.26	0.113	-0.806	-0.88	0.639	0.426	-0.095	-0.82	-0.531	-	0.489	0.278	0	0.701	0.367	-0.66
Wage Relation	-0.65	0.879	0.762	-0.654	0.133	0.691	-0.64	0.663	-0.739	-0.656	0.616	0.137	0.342	-0.662	-0.609	0.489	-	-0.014	0.176	0.681	0.544	-0.83
% Fatal Accid.	-0.26	0.395	0.461	-0.661	0.314	0.152	-0.13	0.054	-0.393	-0.249	-0.055	-0.477	0.502	-0.408	-0.278	0.278	-0.014	-	-0.101	0.516	0.243	-0.42
N. Accidents	-0.7	0.335	0.427	0.075	-0.695	0.718	-0.15	0.669	0.118	0.135	-0.073	-0.353	0.469	-0.423	-0.658	0	0.176	-0.101	-	-0.202	-0.49	-0.02
Jobs	-0.34	0.757	0.63	-0.926	0.663	0.345	-0.44	0.203	-0.964	-0.828	0.705	0.077	0.156	-0.659	-0.426	0.701	0.681	0.516	-	-	0.834	-0.95
Oil Price	0.096	0.445	0.305	-0.651	0.741	-0.012	-0.22	-0.032	-0.782	-0.665	0.715	0.244	-0.097	-0.179	0.051	0.367	0.544	0.243	-0.493	0.834	-	0.77
Ex. rate	0.522	-0.89	-0.782	0.912	-0.486	-0.539	0.554	-0.425	0.958	0.834	-0.743	-0.064	-0.29	0.738	0.582	-0.662	-0.83	-0.421	-0.024	-0.953	0.77	-

FIGURA 23 – Correlação de Pearson

TABELA 30 – Principal Componentes

Componentes	Variância	Proporção	Proporção Acumulada
1	11.396	0.518	0.518
2	5.743	0.261	0.779
3	2.095	0.095	0.874
4	1.222	0.056	0.930
5	0.827	0.038	0.967
6	0.411	0.019	0.986
7	0.195	0.009	0.995
8	0.111	0.005	1.000

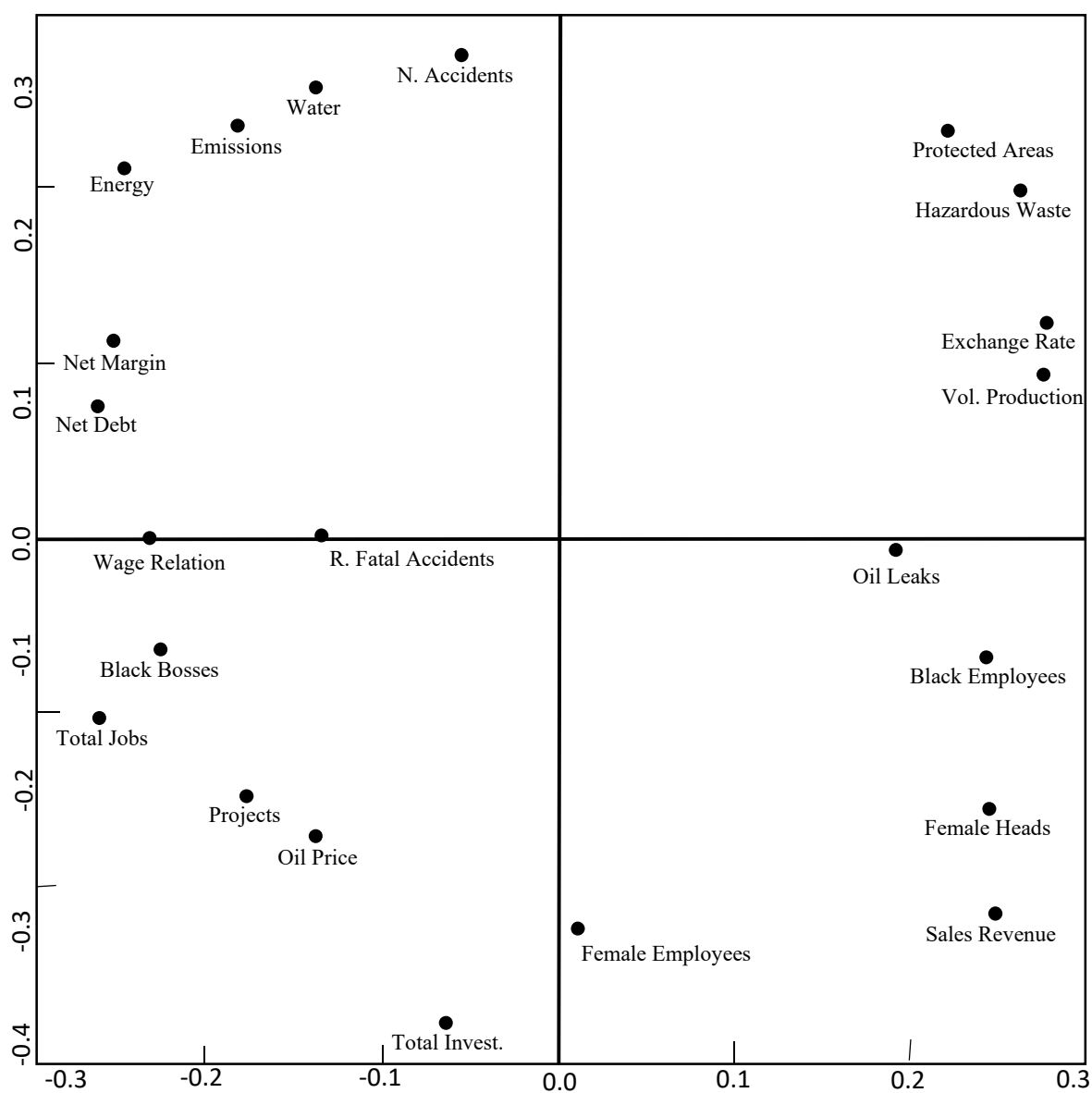


FIGURA 24 – PCA bi plot

### 3.3.3.5 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Com o coeficiente de correlação de 0,829 e o coeficiente de determinação de 0,910 pode-se inferir que a equação linear múltipla é uma técnica adequada para prever valores futuros de sustentabilidade a partir dos parâmetros dos fluxos globais gerados no PROMETHEE. A partir desses resultados pode ser realizada uma previsão com regressão linear múltipla tendo como variável dependente os fluxos globais e variáveis independentes a taxa de câmbio e o Preço do Petróleo. Os dados de entrada da regressão estão ilustradas na Tabela 31.

TABELA 31 – Regressão Linear Múltipla

Anos	Phi	Valor barril do petróleo (USD)	Taxa de Câmbio (Real/USD)
2009	0.0464	61.67	2.00
2010	0.0770	79.50	1.76
2011	0.1042	111.26	1.68
2012	0.0204	111.67	1.96
2013	0.0528	108.66	2.16
2014	-0.0334	98.90	2.35
2015	-0.1482	52.50	3.33
2016	-0.0762	46.00	3.49
2017	-0.0430	53.00	3.19

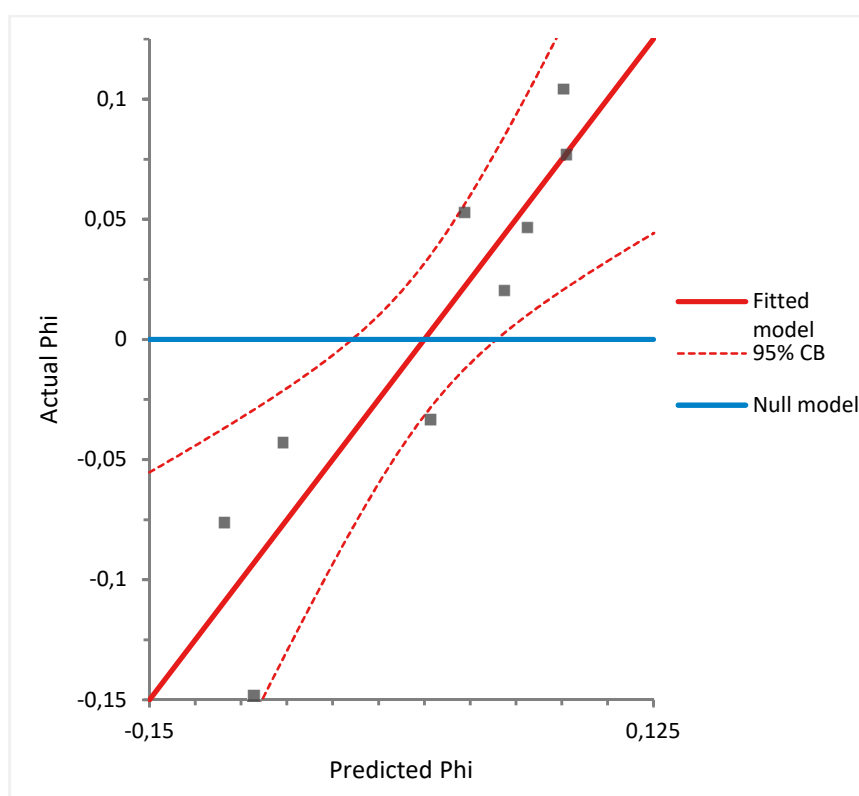


FIGURA 25 – Previsões estimadas

A plotagem do gráfico da regressão linear múltipla está destacado na Figura 25. Os resultados futuros da sustentabilidade organizacional podem ser estimados com base nos valores do preço do petróleo e da taxa de câmbio.

$$Phi = 0.3065 - 0.0003424PP - 0.1145TC \quad (3.26)$$

onde PP é o preço do barril de petróleo e TC é a taxa de câmbio.

TABELA 32 – Regressão Linear Múltipla

Barril do Petróleo	Taxa de Câmbio	Previsão com BP variável e TC fixo em 3,00	Previsão com TC variável e BP fixo em 65
45	2,20	-0,0524	0,0323
50	2,40	-0,0541	0,0094
55	2,60	-0,0558	-0,0135
60	2,80	-0,0575	-0,0364
65	3,00	-0,0593	-0,0593
70	3,20	-0,0610	-0,0822
75	3,40	-0,0627	-0,1051
80	3,60	-0,0644	-0,1280
85	3,80	-0,0661	-0,1509
90	4,00	-0,0678	-0,1738

Previsões foram baseadas na equação linear gerada a partir da regressão linear múltipla. Na Tabela 32 foram simulados 10 cenários sobre o valor do barril do petróleo e da taxa de câmbio entre o Real e o Dólar.

### 3.3.4 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um modelo híbrido usando uma análise de decisão com vários critérios e ferramentas estatísticas baseadas no componente principal e um modelo de regressão linear múltipla.

O modelo híbrido buscava equilibrar as dimensões da sustentabilidade econômica, social e ambiental. Os resultados do PROMETHEE mostraram que o melhor desempenho da empresa foi em 2011 e 2010. O pior foi em 2015 e 2016, o auge da crise econômica no Brasil. A robustez do modelo foi testada através do teste de sensibilidade, alterando os dados de entrada, verificamos pequenas alterações nos resultados. O PROMETHEE como modelo de múltiplos critérios provou ser uma ferramenta apropriada para a análise do desempenho da sustentabilidade. A direção da variabilidade dos indicadores foi destacada pela análise dos componentes principais. Com a inserção de indicadores externos na empresa, foi proposta uma equação linear múltipla para ser utilizada como ferramenta de previsão.

As limitações desta pesquisa estão baseadas na coleta e seleção de indicadores. Os indicadores e dados coletados são limitados aos relatórios de sustentabilidade corporativa publicamente disponíveis. A contribuição e originalidade deste trabalho é o

desenvolvimento de um modelo híbrido com o PROMETHEE como uma ferramenta para avaliar o desempenho da sustentabilidade corporativa com base na comparação de anos. Análise de Componentes Principais como método para medir a colinearidade dos indicadores e a Regressão Linear Múltipla como mecanismo de previsão para o futuro.

Esse modelo híbrido traz resultados claros e objetivos da tomada de decisões e pode ser facilmente replicado para outros tipos e tamanhos de empresas usando relatórios de sustentabilidade disponíveis ao público. A técnica empregada ofereceu um resultado satisfatório comparando o desempenho da sustentabilidade organizacional nos anos de 2009 a 2017. Os resultados da avaliação fornecem informações para a tomada de decisões de negócios. A empresa pode identificar quais dimensões precisam ser aprimoradas e alocar os recursos necessários. Os resultados da previsão podem suportar um planejamento mais objetivo sobre o futuro da empresa.

Sistemas inteligentes podem ser construídos para a tomada de decisões com base na hibridação de modelos. Não apenas a combinação de modelos analíticos e de programação linear, mas também com métodos heurísticos e simulação. Uma proposta para trabalhos futuros e para outros pesquisadores é a combinação de modelos com multi-atributos e multi-objetivos, para avaliar e otimizar o desempenho da sustentabilidade corporativa.



### 3.4 ARTIGO 04 - SEGUNDA APLICAÇÃO DO MODELO HÍBRIDO

#### MÉTODO INTEGRADO COMBINANDO MODELOS ANALÍTICOS E MATEMÁTICOS PARA AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE CADEIAS DE SUPRIMENTOS SUSTENTÁVEIS: UM ESTUDO DE CASO BRASILEIRO

---

**STATUS** - Publicado no Journal *Computers and Industrial Engineering* (ISSN: 0360-8352). *Impact Factor: 3.518*

---

**RESUMO** - Estudos sobre a medição e avaliação da sustentabilidade são requisitos fundamentais no gerenciamento sustentável da cadeia de suprimentos. Neste trabalho, é proposto o desenvolvimento de um método integrado para avaliar a sustentabilidade de uma cadeia de suprimentos de petróleo e gás. Um método para avaliação e otimização da sustentabilidade combinando modelos analíticos e matemáticos. A Análise Hierárquica dos Processos (AHP) e o *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE) são implementados para avaliação multi-atributo. A Programação de Metas é implementada como método multi-objetivo. O experimento é conduzido com os dados de uma empresa brasileira de petróleo e gás. Os resultados da avaliação demonstraram o desempenho da sustentabilidade entre 2009 a 2017, com seu melhor desempenho em 2011. Com base na AHP, especialistas determinaram que os parâmetros ambientais são mais relevantes que os aspectos sociais. Assim, a otimização proposta utilizando o modelo matemático teve por objetivo direcionar os gastos para os parâmetros mais importantes para alcançar a sustentabilidade. Entre os fatores ambientais, a otimização direciona as despesas para gastos com produção/operação e os gastos com recuperação de áreas degradadas, enquanto que os parâmetros sociais, direciona as despesas para gastos com projetos sociais externos. Este estudo contribui como um modelo híbrido de tomada de decisão que pode ser replicado em outras empresas. Como sugestão, os modelos podem ser combinados com outras técnicas de modelos analíticos e matemáticos. Modelos de simulação também podem ser combinados para avaliação e otimização da sustentabilidade

**PALAVRAS-CHAVE:** Cadeia de Suprimentos Sustentável, AHP, Programação de Metas, PROMETHEE, Sistemas de apoio a decisão.

*INTEGRATED METHOD COMBINING ANALYTICAL AND MATHEMATICAL MODELS FOR EVALUATION AND OPTIMIZATION OF SUSTAINABLE SUPPLY CHAINS: A BRAZILIAN CASE STUDY*

**ABSTRACT** - Studies on the measurement and evaluation of sustainability are fundamental requirements in sustainable supply chain management. Herein, the development of an integrated method for evaluating the sustainability of an oil and gas supply chain is proposed. A method defined as sustainability evaluation and optimization is a combination of analytical and mathematical models. The analytical hierarchy process (AHP) and preference ranking organization method for enrichment evaluations (PROMETHEE) are implemented in multi-attribute models. Preemptive goal programming is used in the multi-objective method. Experiments are conducted with the data from a Brazilian oil and gas company. The results demonstrate sustainability performance from 2009 to 2017, with its best performance in 2011. Based on the AHP, experts determined that the environmental parameters are more relevant than the social aspects. Thus, the optimization proposed using the mathematical model to direct spending to the more important parameters for achieving sustainability. Among the environmental factors, the optimization directs expenses toward production/operation and recovery of degraded areas, whereas among the social parameters, it directs expenses toward external social projects. This study contributes to a hybrid model for decision-making that can be replicated in other companies. As a suggestion, this can be combined with other techniques of analytical and mathematical models. A stochastic simulation can also be used to analyze the performance of organizations.

**KEYWORDS:** Sustainable supply chain; AHP; Goal programming; PROMETHEE; Decision support system

### 3.4.1 INTRODUÇÃO

A avaliação do desempenho das empresas em termos de sustentabilidade é difícil de alcançar porque a sustentabilidade incorpora parâmetros multicritérios (ASHBY; LEAT; HUDSON SMITH, 2012). No entanto, a avaliação da sustentabilidade desempenha um papel importante na consecução dos objetivos do desenvolvimento sustentável, porque identifica os pontos fortes e fracos das organizações em relação ao desempenho econômico, social e ambiental (CORY SEARCY, 2015). Com base nos resultados de uma avaliação de desempenho, as organizações podem tomar decisões pela sustentabilidade da cadeia de suprimentos (SEURING; MÜLLER, 2008).

O gerenciamento sustentável da cadeia de suprimentos (SSCM) é uma área emergente na pesquisa e na indústria. É considerado um assunto de alta relevância, onde as organizações buscam aumentar sua competitividade através da inserção de práticas sustentáveis em seus produtos e serviços. A medição do desempenho e otimização são fatores importantes para as práticas sustentáveis (ANSARI; KANT, 2017), (GAO et al., 2017), (HASSINI; SURTI; SEARCY, 2012).

Existem diferentes técnicas e métodos que auxiliam na avaliação sustentabilidade corporativa. A sustentabilidade é fundamental para o desenvolvimento e manutenção da competitividade de uma cadeia de suprimentos. Exemplos dessas ferramentas e metodologias são citados em (BRANDENBURG; GOVINDAN et al., 2014), (ESKANDARPOUR et al., 2015), (RAJEEV et al., 2017). Vários modelos para análise da sustentabilidade de cadeias de suprimentos são baseados no escopo de modelos analíticos. Essas ferramentas são usadas na ecologia industrial para quantificar e avaliar os impactos ambientais da geração de resíduos, emissões gasosas, consumo de recursos e água e energia produzidas durante todo o seu ciclo de vida. Embora os avanços na prática e na teoria tenham contribuído para a sustentabilidade da cadeia de suprimentos, a questão ainda não amadureceu suficientemente (KIRCHOFF; OMAR; FUGATE, 2016).

O uso de abordagens multicritérios pode permitir a escolha ou classificação de práticas sustentáveis mais adequadas para serem utilizadas nas empresas (CHARDINE-BAUMANN; BOTTA-GENOULAZ, 2014). Nos estudos de Stindt (2017) foi demonstrado uma abordagem para integrar diferentes conceitos e técnicas de sustentabilidade. Um exemplo dessa integração é a integração da avaliação do ciclo de vida (ACV) com um modelo matemático multiobjetivo (GAN; CHENG; LO, 2016). Outro exemplo é a integração de um modelo matemático para otimização com um modelo analítico (MATTIUSSI; ROSANO; SIMEONI, 2014). Assim, o desenvolvimento de um método integrado para análise e otimização é uma oportunidade para preencher uma



FIGURA 26 – Escopo do Artigo

lacuna na avaliação e otimização da sustentabilidade da cadeia de suprimentos.

A maioria das pesquisas estão relacionadas com modelos analíticos como a Análise Hierárquica dos Processos (AHP), *the preference ranking organization method for enrichment evaluations (PROMETHEE)*, *elimination et choix traduisant la réalité (ELECTRE)*, and *the decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL)* (RAMEZANKHANI; TORABI; VAHIDI, 2018). A técnica AHP e análise de envelope de dados (DEA) são os mais utilizados e, às vezes, são combinados (LIMA-JUNIOR; CARPINETTI, 2017).

Modelos multiobjetivos, como programação de metas, programação não linear, simulação e lógica fuzzy estão entre os modelos citados por (RAJEEV et al., 2017). Outro modelo matemático para otimização é a programação linear com números inteiros mistos (MILP), usada para otimização na indústria (ZHANG, Q. et al., 2014). Métodos heurísticos também são usados para modelar problemas na sustentabilidade da cadeia de suprimentos. Um exemplo é a aplicação da inteligência de enxame e a colônia de abelhas artificial (ZHANG, S. et al., 2016).

Assim é necessário incorporar técnicas matemáticas, analíticas, heurísticas e de simulação para resolução em sistemas complexos, como a sustentabilidade de cadeia de suprimentos (BRANDENBURG; GOVINDAN et al., 2014). Para a tomada de decisão, é necessário extrair a realidade atual corretamente, analisar como as métricas são consolidadas e otimizar quantitativamente para a melhor decisão. Portanto, o desenvolvimento de um método desse tipo proporcionará aos tomadores de decisão uma ferramenta importante para obter melhores resultados e decisões (SEURING, 2013).

Economias emergentes como o Brasil exigem modelos eficientes para o ge-

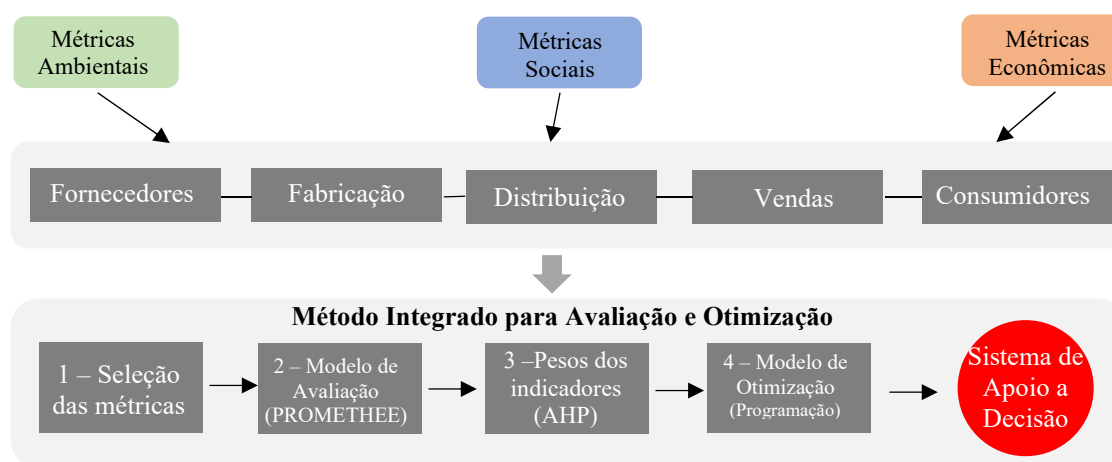


FIGURA 27 – Proposta do Modelo

renciamento da cadeia de suprimentos, e essa é uma área de pesquisa proposta por (RAJEEV et al., 2017). Nesse estudo, o autor afirmou que é necessário realizar estudos com foco em sustentabilidade de cadeia de suprimentos (SCS) em mercados emergentes com práticas principalmente em indústrias que causam mais poluição. No Brasil, políticas governamentais afetam diretamente o desempenho do setor de petróleo e gás setor. Portanto, mecanismos de avaliação e otimização são cruciais para a tomada de decisões em um SCS. De acordo com um estudo de Mahmoudi et al. (2019), o papel do governo na aplicação de impostos é importante para a minimização de efeitos ambientais e sociais.

Esta pesquisa visa preencher a lacuna na integração de modelos para avaliação e otimização da sustentabilidade em cadeia de suprimentos. O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento do método de avaliação e otimização da performance da sustentabilidade para organizações do setor do petróleo e gás. O escopo deste artigo (ver Figura 26) está organizado em quatro partes: introdução, materiais e método, resultados / discussão e conclusões.

### 3.4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O método proposto é uma combinação de modelos analíticos e matemáticos. O método é mostrado na Figura 27 e é apresentado em quatro etapas.

Etapa I. Na primeira etapa, métricas como dimensões e indicadores selecionados para medir a sustentabilidade na cadeia de suprimentos. Os indicadores mais proeminentes e consolidados são analisados (consulte a Tabela 33), por exemplo,

*Global Reporting Initiative (GRI), Commission on Sustainable Development (CSD), Sustainable Economic Welfare Index (ISEW), Sustainable Development Index (SDI), Ethos Institute, and Sustainable Development Goals (SDGs).*

TABELA 33 – Principais indexadores da sustentabilidade

Indexador	Quantidade
Global Reporting Initiative (GRI)	79
Commission on Sustainable Development (CSD)	96
Index of Sustainable Economic Welfare (ISEW)	20
Sustainable Development Index (SDI-IBGE)	63
Ethos Institute	47
Sustainable Development Goals (SDGs)	17

Etapa II. Um modelo analítico multi-atributos é estabelecido usando o técnica PROMETHEE, descrito por (BEHZADIAN et al., 2010). O desempenho da sustentabilidade da cadeia de suprimentos da empresa selecionada é analisado com base em 19 indicadores. O desempenho da sustentabilidade da empresa obtido no PROMETHEE é comparado em uma escala de tempo anual. O desempenho da sustentabilidade indica o nível de sustentabilidade da empresa e subsidia a próxima etapa de otimização. Os passos para PROMETHEE I e II são apresentados abaixo:

a) Determinação dos desvios baseados na comparação paritária.

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j \quad (3.27)$$

Onde  $d_j(a, b)$  significa a diferença entre as avaliações de a e b quanto aos critérios estabelecidos.

b) Aplicação da matriz de preferência.

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)]_{j = 1, k,} \quad (3.28)$$

Onde  $P_j(a, b)$  significa a preferência da alternativa A e B para o critério estabelecido em função de  $d_j(a, b)$ .

c) Cálculo do índice de preferência global.

$$\forall a, b \in A; \pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)w_j \quad (3.29)$$

d) Cálculo dos fluxos individuais (PROMETHEE I).

$$\phi^+(a) = 1/(n-1) \sum_{X \in A} X \in A \quad (3.30)$$

$$\phi^-(a) = 1/(n-1) \sum_{X \in A} X \in A \quad (3.31)$$

Onde  $\phi^+(a)$ ,  $\phi^-(a)$  significa fluxos positivos e fluxos negativos, respectivamente, para cada alternativa.

e) Cálculo dos fluxos globais (PROMETHEE II).

$$\phi(a) = [\phi^+(a)] - [\phi^-(a)], \quad (3.32)$$

Onde  $\phi(a)$  significa o fluxo global para cada alternativa.

Etapa III. Após realizar a análise com o PROMETHEE, é necessário estabelecer os pesos e prioridades dos aspectos selecionados. Essa ponderação serve como parâmetro fundamental no desenvolvimento dos pesos para o modelo matemático no GP. Os pesos são estabelecidos através da técnica da Análise Hierárquica dos Processos. De acordo com estudos anteriores (SAATY, 2008), o método AHP funciona por comparações ponto a ponto em uma escala numérica (escala fundamental de Saaty), indicando a extensão da importância de um elemento sobre o outro. Portanto, as prioridades de um sistema podem ser determinadas. As etapas do AHP são as seguintes: 1. Cálculo do vetor dos pesos dos critérios, 2. Cálculo da matriz das pontuações das alternativas, 3. Classificação das alternativas e 4. Análise da consistência. As informações para julgamento dos critérios é realizada com um questionário de pesquisa junto a especialistas. Os questionários foram enviados a 20 especialistas na área de sustentabilidade.

Etapa IV Desenvolvimento do modelo matemático multiobjetivo com a técnica programação de metas priorizada, chamada de lexicográfico. Esse modelo de programação de metas orienta a tomada de decisão em relação a gastos e investimentos nas dimensões social e ambiental. Esses resultados podem ser interpretados e, portanto, é possível tomar decisões mais eficientes com base na sustentabilidade. A melhoria contínua é inevitável para a tomada de decisões, e esse método é continuamente atualizado e aprimorado. Um modelo clássico de GP pode ser expresso da seguinte maneira:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n (W_i^+ d_i^+) + (W_i^- d_i^-) \quad (3.33)$$

Onde:

$$X \in F, d_i^- \geq 0, d_i^+ \geq 0, d_i^+ \cdot d_i^- = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (3.34)$$

$$Ax \leq C \quad (3.35)$$

$$x_i, d_i^+, d_i^- \geq 0, d_i^+ \cdot d_i^- = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (3.36)$$

Onde  $F_i(x)$  são as múltiplas funções objetivos e  $X$  é o vetor das variáveis de decisão  $X_i$ ;  $d_i^+, d_i^-$ , as variáveis auxiliares de desvio positivas e negativas, vinculadas a cada meta  $g_i$  estabelecida para os objetivos  $i$ ;  $W_i^+, W_i^-$ , os pesos atribuídos às variáveis de desvio  $d_i^+, d_i^-$ ;  $A$  e  $C$ , a matriz dos coeficientes do lado esquerdo (LHR) das variáveis e o vetor de constantes do lado direito (RHS), pelas restrições do modelo.

Com os pesos pré-estabelecidos, desenvolvemos um modelo matemático multiobjetivo com GP preventivo ou lexicográfico. Esse modelo de estabelecimento de metas orienta a tomada de decisão em relação a gastos e investimentos nas dimensões social e ambiental. Esses resultados são interpretados e, portanto, é possível tomar decisões que levem a mais sustentabilidade. A melhoria contínua é inevitável para a tomada de decisões, e esse método é continuamente atualizado e aprimorado. Um modelo clássico de GP pode ser expresso da seguinte maneira:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n |f_i(X) - g_i| \quad (3.37)$$

$$\text{s.t. } X \in F (F \text{ is a nivel set}) \quad (3.38)$$

onde  $f_i(X)$  é a função do  $i$ -ésimo objetivo e  $g_i$  é o nível de aspiração do  $i$ -ésimo objetivo.

O GP é proposto para minimizar os desvios dos objetivos e seus níveis de aspirações. Vários problemas de minimização podem ser resolvidos com vários tipos de métodos, como MIN MAX GP, GP ponderado e lexicográfico (GP preventivo), GP inteiro, GP não linear, GP estocástico, GP fracionário, GP iterativo, GP com intervalos, GP de intervalo estendido, GP difuso e GP lexicográfico estendido difuso (AOUNI; KETTANI, 2001).



### 3.4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo de caso é realizado em uma grande empresa de petróleo e gás. A maior empresa do Brasil, possui cerca de 300.000 funcionários diretos e indiretos, produzindo uma média de 2680 mil boed (barris de petróleo equivalente por dia). Uma crise no setor de petróleo e gás do país demonstrou a relevância deste estudo. Os dados coletados são de relatórios de sustentabilidade divulgados pela empresa a cada ano. O desempenho é analisado com os dados de 2009 a 2017 e a otimização é realizada para a tomada de decisão em relação aos gastos sociais e ambientais

#### 3.4.3.1 SELEÇÃO DE MÉTRICAS

Esta etapa consiste em escolher ou construir indicadores para medir e analisar os parâmetros de sustentabilidade. Esses indicadores são mais comumente usados pelas comunidades científicas e organizacionais. É então possível integrar esses indicadores e escolher os mais adequados para medir a sustentabilidade da cadeia de suprimentos de petróleo e gás. A seleção dos indicadores deve ser realizada de acordo com os objetivos da empresa. Esta seleção pode contribuir para diferentes resultados. O objetivo desta avaliação não é comparar o desempenho da empresa com outras organizações, mas comparar o desempenho da empresa na escala de tempo. É por isso que o modelo pode ser replicado para medir o desempenho de outras organizações. A divisão das dimensões é trivial (Econômica, Ambiental e Social) com 19 indicadores e é mostrada na Figura 28.

#### 3.4.3.2 MODELAGEM ANALÍTICA: PROMETHEE

O PROMETHEE como técnica de análise multi atributos tem como primeira etapa o cálculo das funções de preferência, a segunda etapa a determinação dos fluxos e terceira etapa da interpretação e apresentação dos resultados. Os critérios analisados são os indicadores listados na Tabela 34. Eles foram analisados e comparados com as alternativas de tempo de 2009 a 2017. Os graus de preferência e fluxos obtidos estão listados na Tabela 35. Utilizando os fluxos determinados, observa-se que nos anos 2009 a 2017, o melhor desempenho de sustentabilidade foi alcançado em 2011, seguido por 2010 e 2009 (Figura 29).



FIGURA 28 – Métricas Selecionadas

TABELA 34 – Entradas do PROMETHEE

Crítérios	Max/Min	Função de preferência	-Q	-P
Endividamento (milhões)	Min	V-Shape	na	238,519.30
Volume de Produção (boed)	Max	V-Shape	na	175.07
Margem Líquida	Max	V-Shape	na	0.25
Receita (milhões)	Max	V-Shape	na	112,185.10
Áreas Protegidas (un)	Max	Linear	394.620	874.43
Vazamentos de óleos (m <sup>3</sup> )	Min	Linear	174.060	411.51
Resíduos Perigosos (tons)	Min	Linear	25.530	59.72
Consumo de Energia (Tj)	Min	Linear	171,956.900	451,237.10
Consumo de água (milhões m <sup>3</sup> )	Min	Linear	9.480	24.05
Emissões de CO <sup>2</sup> (ton)	Min	Linear	7.210	19.52
Projetos sócio-ambientais (un)	Max	Linear	166.330	426.14
Empregados mulheres (%)	Max	Linear	0.030	0.25
Empregados negros(%)	Max	Linear	0.030	0.25
Chefes mulheres(%)	Max	Linear	0.030	0.25
Chefes negros(%)	Max	Linear	0.030	0.25
Relação maior/menor salário (min max)	Min	V-Shape	na	9.90
Taxa de acidentes fatais	Min	Linear	0.025	0.25
Quantidade de Acidentes (un)	Min	V-Shape	na	5062.90
Empregos totais (un)	Max	Linear	64,052.400	141,584.70

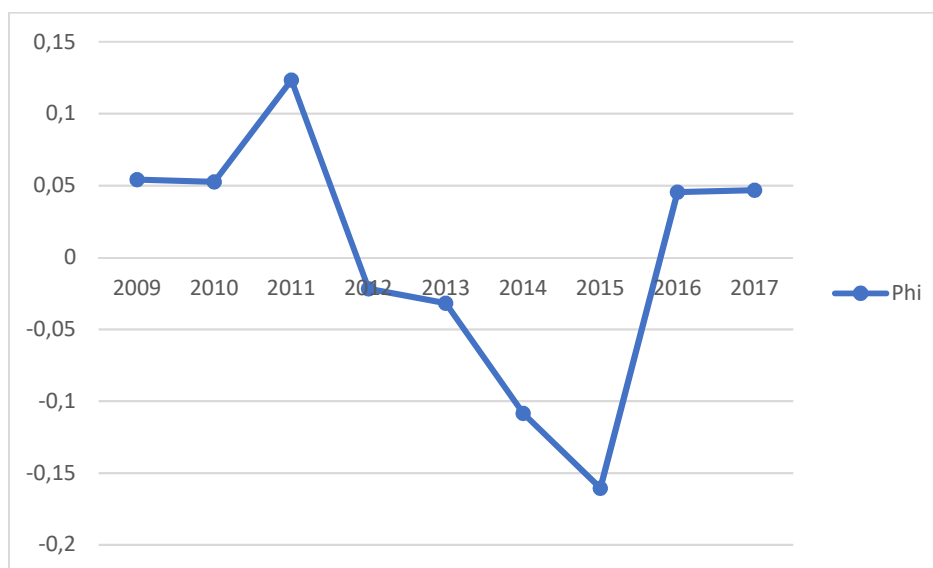


FIGURA 29 – Gráfico do ranqueamento

TABELA 35 – Ranqueamento da performance

Rank	Ano	Phi	Phi+	Phi-
1	2011	0.1338	0.2960	0.1622
2	2010	0.0761	0.2851	0.2091
3	2009	0.0629	0.3085	0.2456
4	2012	-0.0287	0.1797	0.2084
5	2013	-0.0468	0.1823	0.2291
6	2014	-0.0904	0.1940	0.2844
7	2015	-0.1068	0.2676	0.3744

O pico de sustentabilidade é observado em 2011, apresentando decréscimo da sustentabilidade desde então. A causa dessa queda é principalmente em endividamento que aumentou significativamente. Em 2009, o desempenho econômico foi aprimorado com um aumento na margem de lucro e volume de produção e uma baixa dívida líquida. Isso implica que, como a economia estava estável, a atenção estava focada no desempenho ambiental e social. A partir de 2012, a margem de lucro parou de aumentar e a dívida líquida da empresa aumentou. Portanto, até 2015, a tomada de decisão foi focada nos indicadores econômicos.

### 3.4.3.3 ANÁLISE HIERÁRQUICA DOS PROCESSOS

A análise utilizando a AHP visa ponderar os indicadores ambientais e sociais. Essa

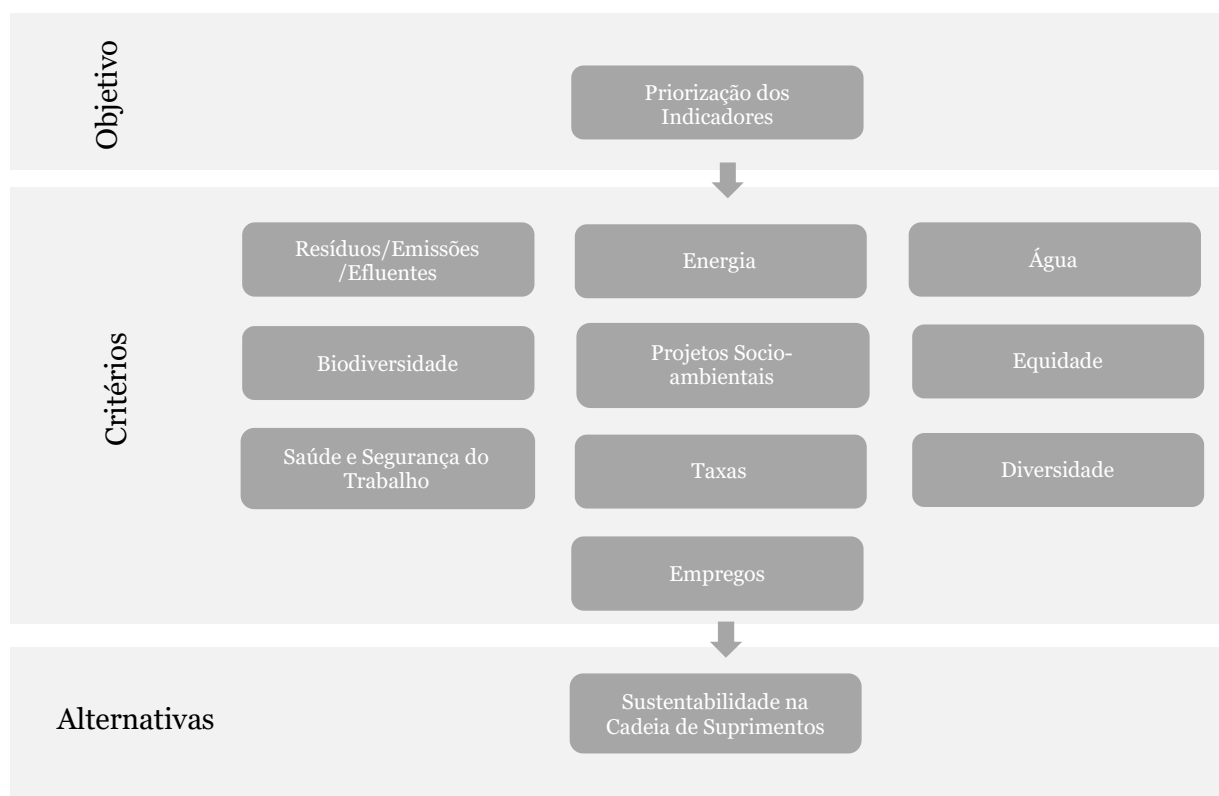


FIGURA 30 – Estrutura da AHP

análise é usada para estabelecer os pesos de um modelo matemático de programação de metas. O objetivo desta análise é ponderar os critérios escolhidos. Uma matriz do AHP é mostrada na Figura 30. Após uma comparação entre pares usando julgamento de especialistas, a matriz normalizada apresentada na Figura 31 foi obtida. Os resultados dos indicadores de ponderação derivados dessa matriz principal normalizada estão listados na Tabela 37. Segundo os especialistas, os temas mais importantes são a geração de resíduos e emissões, seguidos de saúde e segurança ocupacional, energia e água, consumo e biodiversidade. Em comparação, os temas sociais de diversidade, equidade, emprego, projetos socioambientais e impostos são de menor importância.

#### 3.4.3.4 MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo matemático baseado na programação linear por metas visa otimizar a tomada de decisão em relação aos gastos associados aos aspectos ambientais e sociais. Os pesos são definidos no AHP. Assim, a formulação de um modelo de programação de metas com priorização visa minimizar os desvios dos objetivos sociais e ambientais. Conseqüentemente, a função objetivo e suas restrições foram desenvolvidas para ter as

Matrix	Resíduos/ Efluentes / Emissões	Energia	Água	Biodiversidade	Projetos	Empregos	Diversidade	Equidade	Saúde e Segurança	Taxas	Normalização principal Eigenvector	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Resíduos/ Efluentes / Emissões	1	0	1 8/9	5/7	6 3/7	6 6/7	3 1/4	8	3 1/4	4 7/8	3 1/4	28,30%
Energia	2	1/2	0	1	2 1/3	3 1/5	3 1/4	3	3	4/7	3	12,72%
Água	3	1 2/5	1	0	1 3/7	1 3/4	2	1 8/9	2	2/5	2	11,59%
Biodiversidade	4	1/6	3/7	2/3	0	2	4 1/3	2 2/3	4 1/3	3/4	3 1/2	10,19%
Projetos	5	1/7	1/3	4/7	1/2	0	1 1/5	1 3/8	1 1/5	1/4	1	4,42%
Empregos	6	1/3	1/3	1/2	1/4	5/6	0	1/2	1/2	1/4	3/5	3,61%
Diversidade	7	1/8	1/3	1/2	3/8	3/4	1 6/7	0	1	1/4	7/8	4,07%
Equidade	8	1/3	1/3	1/2	1/4	5/6	1 6/7	1	0	1/6	7/8	4,27%
Saúde e Segurança	9	1/5	1 3/4	2 3/7	1 1/3	4 1/5	4 1/5	4	6 2/7	0	2 2/7	15,93%
Taxas	10	1/3	1/3	1/2	2/7	1	1 5/8	1 1/7	1 1/7	4/9	0	4,90%

FIGURA 31 – Matriz Normalizada da AHP

seguintes formas. As restrições de metas foram determinadas através de correlações entre variáveis. A regressão linear múltipla foi aplicada no cálculo das equações. As variáveis do modelo estão listadas na Tabela 36

TABELA 36 – Variáveis do modelo

Variável	Descrição
X1	Custos ambientais com produção e operação
X2	Custos com sistemas de controle da poluição
X3	Custos com recuperação de áreas degradadas
X4	Custos com projetos sócio-ambientais externos
X5	Volume de produção
X6	Gastos com saúde e segurança do trabalho
X7	Gastos internos com o social
X8	Gastos externos com o social
X9	Número de empregados incluindo terceiros

A função objetivo e suas restrições foram desenvolvidas para se ter as seguintes formas:

### Função Objetivo

$$\begin{aligned} LexMinz = & P_1(d_1^- + d_1^+) + P_2(d_2^- + d_2^+) + P_3(d_3^- + d_3^+) + P_4(d_4^- + d_4^+) + P_5(d_5^- + d_5^+) + \\ & P_6(d_6^- + d_6^+) + P_7(d_7^- + d_7^+) + P_8(d_8^- + d_8^+) + P_9(d_9^- + d_9^+) + P_{10}(d_{10}^- + d_{10}^+) + \\ & P_{11}(d_{11}^- + d_{11}^+) + P_{12}(d_{12}^- + d_{12}^+) + P_{13}(d_{13}^- + d_{13}^+) + P_{14}(d_{14}^- + d_{14}^+) \end{aligned} \quad (3.39)$$

### Restrições das metas (Ambientais)

$$0.0105X_{a1} + 0.0606X_9 + 11.944 + d_1^- - d_1^+ = 200(\text{Consumodegua}) \quad (3.40)$$

$$399.679X_{a1} - 400.386X_9 + 1023759.4 + d_2^- - d_2^+ = 1155185(\text{Consumodeenergia}) \quad (3.41)$$

$$-1.921X_{a2} - 3.519X_9 + 9869.023 + d_3^- - d_3^+ = 283(\text{Vazamentosdeleoederivados}) \quad (3.42)$$

$$0.03627X_{a2} + 0.09121X_9 + 176.656 + d_4^- - d_4^+ = 78(\text{Emisses}) \quad (3.43)$$

$$-0.1121X_{a2} - 0.4443X_9 + 1441.59 + d_5^- - d_5^+ = 200(\text{Resduosperigosos}) \quad (3.44)$$

$$0.0146X_{a3} + 27.36 + d_6^- - d_6^+ = 40(\text{reasdegradadas}) \quad (3.45)$$

$$2.19X_4 + 190.90 + d_7^- - d_7^+ = 1500(\text{Projetossocio - ambientais}) \quad (3.46)$$

### Restrições das metas (Sociais)

$$0.0000013X_6 - 0.0000024X_7 + 0.1541 + d_8^- - d_8^+ = 0.17(\text{Empregadosmulheres}) \quad (3.47)$$

$$0.0000099X_6 + 0.000142X_7 + 0.04094 + d_9^- - d_9^+ = 0.25(\text{Empregadosnegros}) \quad (3.48)$$

$$0.00051335X_6 - 0.007836X_7 + 4.5545 + d_{10}^- - d_{10}^+ = 0.15(\text{Chefesmulheres}) \quad (3.49)$$

$$-0.0000024X_6 - 0.0000020X_7 + 0.279 + d_{11}^- - d_{11}^+ = 0.25(\text{ChefesNegros}) \quad (3.50)$$

$$-0.00081X_6 + 0.03641X_7 + 17.36 + d_{12}^- - d_{12}^+ = 31.03(\text{Relaomaioremenorsalrio}) \quad (3.51)$$

$$-0.0000563X_5 - 0.0000061X_9 + 3.62151 + d_{13}^- - d_{13}^+ = 1.25(\text{TaxadeAcidentesFatais}) \quad (3.52)$$

$$-42.9484X_5 - 0.01572X_9 + 10911.44 + d_{14}^- - d_{14}^+ = 4322.33(\text{AcidentesTotais}) \quad (3.53)$$

#### Restrições do Sistema (Variáveis)

$$X_1 = 2915.8(\text{Investimentosambientaiscomproduoeoperao}) \quad (3.54)$$

$$X_2 = 170.93(\text{Investimentoscomequipamentosesistemasdecontroledapoluio}) \quad (3.55)$$

$$X_3 \geq 191.3(\text{Investimentoscomrecuperaodereasdegradadas}) \quad (3.56)$$

$$X_4 \geq 126.70(\text{Investimentosemprojetosepatriosambientais}) \quad (3.57)$$

$$X_5 = 2787(\text{Volumedeproduo}) \quad (3.58)$$

$$X_6 \geq 226.33(\text{Investimentoscomsadeeseguranadotrabalho}) \quad (3.59)$$

$$X_7 \geq 11833(\text{Investimentossociaisinternas}) \quad (3.60)$$

$$X_8 \geq 415(\text{Investimento em projetos sociais e patrocínios}) \quad (3.61)$$

$$X_9 = 351605.33(\text{Número total de empregados}) \quad (3.62)$$

\* Todas as variáveis não são negativas.

A priorização das metas foi estabelecida usando o AHP e é apresentada na Tabela 37

TABELA 37 – Priorização das metas

Pesos Ambientais	Pesos Sociais
P1=11.59	P8=4.07
P2=12.72	P9=4.07
P3=28.30	P10=4.27
P4=28.30	P11=4.27
P5=28.30	P12=4.27
P6=10.19	P13=15.93
P7=4.42	P14=15.93

Com os dados de entrada parametrizados, a otimização foi realizada a partir do Software Excel Solver. Os resultados obtidos da otimização podem ser visualizados nas Figuras 32 e 33.

Metas	Desvios			Metas	Desvios			Metas	Desvios		
Water	$d_1^+$	=	13.6	Deg. areas	$d_6^+$	=	0	B. bosses	$d_{11}^+$	=	0.0003
	$d_1^-$	=	0		$d_6^-$	=	0		$d_{11}^-$	=	0
Energy	$d_2^+$	=	0	Projects	$d_7^+$	=	0	Wage rate	$d_{12}^+$	=	0
	$d_2^-$	=	0		$d_7^-$	=	0		$d_{12}^-$	=	0
Oil Leaks	$d_3^+$	=	0	F. employees	$d_8^+$	=	0	F. accidents	$d_{13}^+$	=	0.21
	$d_3^-$	=	549.7		$d_8^-$	=	0.02		$d_{13}^-$	=	0
Emissions	$d_4^+$	=	5.7	B. employees	$d_9^+$	=	0.004	N. accidents	$d_{14}^+$	=	14.41
	$d_4^-$	=	0		$d_9^-$	=	0		$d_{14}^-$	=	0
Waste	$d_5^+$	=	0	F. heads	$d_{10}^+$	=	5.47				
	$d_5^-$	=	15.8		$d_{10}^-$	=	0				
								<b>Solution (Min)</b>	=	16583.17	

FIGURA 32 – Resultados da programação de metas



	LHS		RHS	Teste de Sensibilidade	
				Pode aumentar	Pode reduzir
X <sub>1</sub>	3120.757863	≥	2915.8	5083.795185	5084.038575
X <sub>2</sub>	170.93	≥	170.93	1E+30	58.563171
X <sub>3</sub>	865.7534247	≥	191.3	0.148774	0.148774
X <sub>4</sub>	597.7610959	≥	126.7	9.6798	9.6798
X <sub>5</sub>	2787	=	2787	1E+30	1E+30
X <sub>6</sub>	226.33	≥	226.33	1E+30	684.1671151
X <sub>7</sub>	11833	≥	11833.00	1E+30	0.001495481
X <sub>8</sub>	638.6907443	≥	415.00	0.188368228	0.067222802
X <sub>9</sub>	351605.33	=	351605.33	1E+30	1E+30

FIGURA 33 – Resultados do teste de sensibilidade

Os resultados do modelo matemático de programação de metas multiobjetivo relacionados com as metas ambientais mostraram que para se atingir as metas foram minimizados os desvios das metas onde se obteve desvios nos aspectos de consumo de água, vazamento de óleo, emissões e resíduos perigosos. Para se ter estes resultados os investimentos relacionados à produção e controle precisam ser de 3120,75 milhões, o controle de poluição de 170,93 milhões, a recuperação de áreas degradadas de 865,75 milhões e os projetos socioambientais são de 597,76 milhões, com o volume estável de produção é de 2787 boed (barris de óleo equivalente por dia).

Os resultados do modelo matemático de programação de metas multiobjetivo relacionados com as metas sociais mostraram que para se atingir as metas foram minimizados os desvios das metas onde se obteve desvios no percentual de mulheres e empregados negros, além do percentual de mulheres e chefes negros, número de acidentes e taxa de acidentes fatais. As variáveis otimizadas são as despesas relacionadas à saúde e segurança no trabalho de 226,33 milhões, projetos sociais internos de 11833 milhões e projetos externos de 638,69 milhões, e o número de funcionários, incluindo os terceirizados, é de 351,605.33.

O teste de sensibilidade do modelo matemático demonstrou que algumas variáveis podem aumentar e diminuir valores sem alterar seu resultado. Por exemplo, em X<sub>1</sub>, o valor que pode ser adicionado ou reduzido é 5083. Para X<sub>3</sub>, o valor de aumento ou redução é 0,14. Para X<sub>4</sub>, o valor é 9,67 e para X<sub>8</sub>, 0,188.

#### 3.4.4 CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram o desempenho da sustentabilidade da empresa selecionada de 2009 a 2017, com o melhor desempenho apresentado em 2011. Segundo o AHP, especialistas determinaram que os parâmetros ambientais eram mais relevantes que os aspectos sociais. Assim, a otimização proposta pelo modelo matemático

direcionou os gastos para os parâmetros mais importantes para alcançar a sustentabilidade. Entre os parâmetros ambientais, a otimização direcionou os gastos para produção/operação e para recuperação de áreas degradadas, enquanto que para os parâmetros sociais, direcionou-se os gastos para projetos externos.

As principais contribuições deste trabalho são as seguintes: (1) As organizações precisam de ferramentas para avaliar seu desempenho em sustentabilidade; portanto, métodos aprimorados são importantes para uma melhor medição. (2) As empresas exigem modelos que considerem todos os aspectos da sustentabilidade para a tomada de decisões. (3) Os estudos sobre avaliação da sustentabilidade nas cadeias de suprimento são insuficientes; portanto, mais pesquisas são essenciais para promover ferramentas de avaliação de desempenho e tomada de decisão com base em critérios ambientais, sociais e econômicos.

Assim, a contribuição deste trabalho está relacionada à avaliação e melhoria da sustentabilidade da cadeia de suprimentos. Ao combinar modelos analíticos e modelos matemáticos como PROMETHEE e Programação de metas, permite-se que os gerentes tenham subsídios para o gerenciamento de decisões. Este método pode ser aplicado em outros cenários usando programação não linear ou combinada com métodos heurísticos para considerar a incerteza. O grande desafio dos modelos combinados que enfrentam as novas tecnologias de coleta de dados é a seleção e ponderação dos principais indicadores de desempenho da sustentabilidade, a utilização de vários indicadores podem resultar em decisões ineficientes quanto ao equilíbrio ambiental, social e econômico. Isso é de tremenda importância principalmente no setor econômico para um país em desenvolvimento como o Brasil. A validação de uma empresa brasileira alcançada neste documento pode ser relevante para estudos em outros países em desenvolvimento. Este método pode ser facilmente replicado por outras empresas e indústrias.

A principal limitação desta pesquisa foi não considerar as incertezas do sistema. Assim, para trabalhos futuros, é proposta a inserção de métodos heurísticos para considerar essa incerteza. Em um estudo anterior Tsao et al. (2018) foi demonstrado o uso da programação de metas com uma heurística a lógica fuzzy. Uma sugestão Soleimani et al. (2017) foi o uso de algoritmos genéticos ou outras meta-heurísticas Devika, Jafarian e Nourbakhsh (2014). Finalmente, Dehghan et al. (2018) combinaram o modelo de programação de número inteiro misto (MILP) com lógica fuzzy e estocástica para avaliar a incerteza de parâmetros para uma cadeia de suprimentos de ciclo fechado. Como sugestão, isso pode ser combinado com outras técnicas de modelos analíticos e matemáticos. Uma simulação estocástica também pode ser usada para analisar o desempenho das organizações.

## 4 CONCLUSÕES

Embora os modelos para avaliação e otimização da performance da sustentabilidade organizacional tenham sido apresentados nos últimos anos, ainda existe uma lacuna no que diz respeito a modelos quantitativos que avaliem e proponham otimização de forma completa. Além disso, os modelos desenvolvidos não estão orientados para avaliar e otimizar problemas complexos como a sustentabilidade. Assim sendo, a execução desta pesquisa foi capaz de propor uma estrutura metodológica combinando métodos multi-atributos e multi-objetivos para avaliação e otimização da performance da sustentabilidade de organizações.

Assim, respondendo as questões da pesquisa. É possível combinar modelos matemáticos e analíticos para auxiliar a tomada de decisões organizacional na avaliação e otimização do desempenho da sustentabilidade. Os modelos matemáticos e analíticos são os mais adequados para avaliação e otimização da sustentabilidade organizacional. Os métodos multicritérios como o multi-atributo PROMETHEE são ideais para avaliação do desempenho e é possível combinar os métodos multi-atributos com os métodos multi-objetivos para tomada de decisão na sustentabilidade organizacional.

Validando a hipótese desta pesquisa, os requisitos do modelo desenvolvido para avaliação e otimização da performance da sustentabilidade de organizações do setor do petróleo e gás baseados nas abordagens dos modelos multicritérios são aderentes aos princípios de objetividade e equilíbrio do desenvolvimento sustentável e, portanto, podem orientar e servir de ferramenta para as organizações do setor do petróleo e gás na sua tomada de decisões para a implementação de cadeias sustentáveis.

Algumas características tornam o método proposto válido e confiável para a tarefa da medição da performance da sustentabilidade corporativa. Em um primeiro momento, o método proposto tratou de adequar e criar novos passos fundamentais a atividade tradicional de medição do desempenho da sustentabilidade, como a seleção das métricas, o mecanismo de avaliação e o modelo de otimização para tomada de decisão. Outra característica relevante do método proposto foi a utilização dos relatórios de sustentabilidade disponibilizados ao público pela organização. E a combinação dos métodos multi-atributos com o método matemático multi-objetivo para a otimização dos resultados. Uma característica importante do método de avaliação, que resolve o problema das diferenças entre as organizações (tamanho, setor, tempo), sem dúvida é o ranqueamento através dos anos do desempenho da sustentabilidade da empresa. Tornando o método independente de comparações com outras empresas.

A construção do método híbrido para avaliação e otimização do desempenho da sustentabilidade das organizações só foi exequível devido ao planejamento e cronograma de trabalho. Reservou no início da pesquisa, uma extensa revisão sistemática sobre os temas da sustentabilidade e modelos multicritérios para avaliação e otimização. Este estudo exploratório como um dos objetivos específicos do trabalho contribuiu com a qualidade da pesquisa e com a confiabilidade dos resultados adquiridos. Alguns trabalhos foram referência para esta pesquisa, tais como Mattiussi, Rosano e Simeoni (2014) sobre a hibridização de modelos multi-atributos e multi-objetivos. E Brandenburg, Govindan et al. (2014) que trás o estudo das abordagens quantitativas para avaliação e otimização de cadeias de suprimentos. O segundo objetivo específico, da proposta do modelo híbrido para avaliação e otimização da sustentabilidade corporativa, permitiu o desenvolvimento de um modelo mais robusto e completo perante os modelos existentes atuais. No último objetivo específico a aplicação e validação do modelo em um estudo de caso na cadeia do petróleo e gás proporcionou a consolidação do método proposto.

Os resultados dessa aplicação trouxeram subsídios para a organização tomar uma decisão mais correta quanto a sustentabilidade de seus processos. Verificou-se em um primeiro momento que o melhor desempenho da organização no intervalo de 2009 a 2017 foram nos anos de 2010 e 2011, os piores desempenhos da empresa foram os anos de 2015 e 2016. Muitas questões justificam o desempenho ruim nestes anos. A corrupção e ingerência tornaram-se públicos nestes anos, influenciando consideravelmente nos resultados da sustentabilidade organizacional. Com o modelo de otimização foi permitido entender e prever cenários futuros para a performance da sustentabilidade empresarial. A expectativa é que o desempenho da sustentabilidade da empresa tenha uma melhoria nos próximos anos.

Em visto dos resultados da avaliação e otimização do desempenho da sustentabilidade de uma empresa do setor do petróleo e gás, seria viável a aplicação do método, futuramente em outros setores e tamanhos de organizações. O método proposto deve auxiliar na tomada de decisões das empresas.

#### 4.1 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Algumas limitações do estudo merecem ser citadas para que melhorias sejam realizadas em trabalhos futuros. As principais limitações deste trabalho seriam:

A seleção das métricas podem ser reconsideradas a partir do momento que se tem ou não dados de entrada suficientes para avaliação e otimização nos métodos propostos. Com isso os resultados podem ser diferentes dos atuais porém tão importantes quanto. A complexidade de ser medir a sustentabilidade é justamente na quantidade e tipos de métricas diferentes.

A coleta de dados de entrada, sendo realizada pelos relatórios de sustentabilidade disponibilizados pelas organizações ficam sujeitas a transparência e confiabilidade que a organização trás para os relatos. Dados coletados diretamente de outros documentos gerenciais podem trazer uma maior confiabilidade dos resultados em questão.

Com a existência de dezenas de modelos multi-critérios, diferentes combinações de técnicas podem trazer outros resultados. Assim o método fica limitado as propostas das técnicas utilizadas. Por último, os modelos matemáticos lineares podem não fornecer resultados satisfatórios para condução de uma planejamento a longo prazo sobre os mecanismos sustentáveis organizacionais.

## 4.2 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

A finalização do programa de doutoramento não significa a finalização da pesquisa científica. Portanto, o método proposto e os resultados apresentados podem servir para dar início a um novo ciclo de pesquisas. Novos mecanismos híbridos para tomada de decisão quanto a sustentabilidade podem ser desenvolvidos.

A ideia da combinação de abordagens proporcionam um leque infinito de modelos híbridos para a tomada de decisões. A combinação de modelos de simulação como eventos discretos podem proporcionar a inserção de variáveis estocásticas no mecanismo de avaliação e otimização. Também com a hibridização dos métodos heurísticos, como por exemplo as meta-heurísticas e a inteligência artificial, podem contribuir com o estudo e análise das incertezas no processo de avaliação e otimização da sustentabilidade das organizações.

## REFERÊNCIAS

AFFUL-DADZIE, Anthony; AFFUL-DADZIE, Eric; TURKSON, Charles. A TOPSIS Extension Framework for Re-Conceptualizing Sustainability Measurement.

**Kybernetes**, v. 45, jan. 2016. DOI: 10.1108/K-04-2015-0106. Citado na p. 79.

AHI, Payman; SEARCY, Cory. A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, v. 52, p. 329–341, 2013. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.018>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261300067X>>.

Citado na p. 46.

ANSARI, Zulfiqar N.; KANT, Ravi. A state-of-art literature review reflecting 15 years of focus on sustainable supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2524–2543, 2017. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.023>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616318613>>.

Citado nas pp. 46, 99.

AOUNI, Belaid; KETTANI, Ossama. Goal programming model: A glorious history and a promising future. **European Journal of Operational Research**, v. 133, n. 2, p. 225–231, jan. 2001. Disponível em:

<<https://ideas.repec.org/a/eee/ejores/v133y2001i2p225-231.html>>. Citado nas pp. 32, 104.

ARSIĆ, Sanela; NIKOLIĆ, Djordje; ŽIVKOVIĆ, Živan. Hybrid SWOT - ANP - FANP model for prioritization strategies of sustainable development of ecotourism in National Park Djerdap, Serbia. **Forest Policy and Economics**, v. 80, p. 11–26, 2017. ISSN 1389-9341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.02.003>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934116301915>>.

Citado na p. 47.

ASHBY, Alison; LEAT, Mike; HUDSON SMITH, Mel. Making connections: A review of supply chain management and sustainability literature. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 17, p. 497–516, ago. 2012. DOI:

10.1108/13598541211258573. Citado na p. 99.

AWASTHI, Anjali; CHAUHAN, Satyaveer S.; OMRANI, Hichem. Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 10, p. 12270–12280, 2011. ISSN 0957-4174. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.005>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417411005215>>.

Citado nas pp. 47, 66.

BALEŽENTIS, Tomas; STREIMIKIENE, Dalia. Multi-criteria ranking of energy generation scenarios with Monte Carlo simulation. **Applied Energy**, v. 185, p. 862–871, 2017. ISSN 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.085>.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916315306>>.

Citado na p. 47.

BAPPY, Mahathir Mohammad et al. Supply chain sustainability assessment with Dempster-Shafer evidence theory: Implications in cleaner production. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, p. 117771, 2019. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117771>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619326319>>.

Citado na p. 47.

BAUMOL, William J. Management models and industrial applications of linear programming, Volume I, by Abraham Charnes and William W. Cooper. John Wiley and Sons, New York, 1961. xxiii + 467 pp. \$11.75. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 9, n. 1, p. 63–64, 1962. DOI: 10.1002/nav.3800090109. eprint:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/nav.3800090109>. Disponível

em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nav.3800090109>>.

Citado na p. 30.

BEHZADIAN, Majid et al. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. **European Journal of Operational Research**, v. 200, n. 1, p. 198–215, 2010. ISSN 0377-2217. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221709000071>>.

Citado nas pp. 75, 80, 102.

BRANDENBURG, Marcus. A hybrid approach to configure eco-efficient supply chains under consideration of performance and risk aspects. **Omega**, v. 70, p. 58–76, 2017.

ISSN 0305-0483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.09.002>. Disponível

em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048316305990>>.

Citado nas pp. 50, 80.

BRANDENBURG, Marcus; GOVINDAN, Kannan et al. Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. **European Journal of Operational Research**, v. 233, n. 2, p. 299–312, 2014. Eco-Efficient Green Supply Chain Management. ISSN 0377-2217. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032>. Disponível em:



<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722171300787X>>.

Citado nas pp. 15, 37, 39, 46, 48, 49, 52, 60, 80, 99, 100, 116.

BRANDENBURG, Marcus; REBS, Tobias. Sustainable supply chain management: a modeling perspective. **Annals of Operations Research**, v. 229, n. 1, p. 213–252, jun. 2015. ISSN 1572-9338. DOI: 10.1007/s10479-015-1853-1. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1007/s10479-015-1853-1>>. Citado na p. 37.

BRANS, J. P.; VINCKE, Ph. Note—A Preference Ranking Organisation Method.

**Management Science**, v. 31, n. 6, p. 647–656, 1985. DOI: 10.1287/mnsc.31.6.647.

eprint: <https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647>. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647>>. Citado na p. 75.

BRANS, J.P.; MARESCHAL, Bertrand. Chapter 5: PROMETHEE methods. **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys**, p. 164–189, jan. 2005. Citado na p. 75.

BUI, Nuong Thi et al. Social sustainability assessment of groundwater resources: A case study of Hanoi, Vietnam. **Ecological Indicators**, v. 93, p. 1034–1042, 2018. ISSN 1470-160X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.005>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X1830445X>>.

Citado na p. 47.

CARTER, Craig R.; ROGERS, Dale S.; CHOI, Thomas Y. Toward the Theory of the Supply Chain. **Journal of Supply Chain Management**, v. 51, n. 2, p. 89–97, 2015.

DOI: 10.1111/jscm.12073. eprint:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jscm.12073>. Disponível em:

<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jscm.12073>>. Citado na p. 60.

CARTER, Craig; EASTON, P. Sustainable Supply Chain Management: Evolution and Future Directions. **International Journal of Physical Distribution Logistics Management**, v. 41, p. 46–62, fev. 2011. DOI: 10.1108/09600031111101420. Citado na

p. 46.

CHARDINE-BAUMANN, Emilie; BOTTA-GENOULAZ, Valérie. A framework for sustainable performance assessment of supply chain management practices.

**Computers Industrial Engineering**, v. 76, p. 138–147, 2014. ISSN 0360-8352. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.07.029>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036083521400237X>>.

Citado na p. 99.

CHATTERJEE, Kajal; PAMUCAR, Dragan; ZAVADSKAS, Edmundas Kazimieras. Evaluating the performance of suppliers based on using the R'AMATEL-MAIRCA method for green supply chain implementation in electronics industry. **Journal of**

**Cleaner Production**, v. 184, p. 101–129, 2018. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.186>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618305055>>.

Citado na p. 47.

CHOFREH, Abdoulmohammad Gholamzadeh; GONI, Feybi Ariani. Review of Frameworks for Sustainability Implementation. **Sustainable Development**, v. 25, n. 3, p. 180–188, 2017. DOI: 10.1002/sd.1658. eprint:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/sd.1658>. Disponível em:

<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sd.1658>>. Citado na p. 37.

CHRISTENSEN, Ronald. **Plane Answers to Complex Questions, The Theory of Linear Models**. 4. ed. [S.l.]: Springer, 2011. DOI: 10.1007/978-1-4419-9816-3.

Disponível em: <<https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1032120902%20and%20https://link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-1-4419-9816-3%2F1.pdf>>.

<https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1032120902%20and%20https://link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-1-4419-9816-3%2F1.pdf>. Citado na

p. 84.

CHRISTOPHER FREY, H.; PATIL, Sumeet R. Identification and Review of Sensitivity Analysis Methods. **Risk Analysis**, v. 22, n. 3, p. 553–578, 2002. DOI:

10.1111/0272-4332.00039. Citado nas pp. 33, 82.

CINELLI, Marco; COLES, Stuart R.; KIRWAN, Kerry. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. **Ecological Indicators**, v. 46, p. 138–148, 2014. ISSN 1470-160X. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.011>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X14002647>>.

Citado na p. 80.

CORY SEARCY, Payman Ahi e. An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains. **Journal of Cleaner Production**, v. 86, n. 86, p. 360–377, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.005>. Citado nas pp. 24, 36, 51, 52, 59, 79, 99.

D'EUSANIO, Manuela; ZAMAGNI, Alessandra; PETTI, Luigia. Social sustainability and supply chain management: Methods and tools. **Journal of Cleaner Production**, v. 235, p. 178–189, 2019. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.323>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619323005>>.

Citado na p. 81.

DEHGHAN, Ehsan et al. Hybrid robust, stochastic and possibilistic programming for closed-loop supply chain network design. **Computers Industrial Engineering**, v. 123, p. 220–231, 2018. ISSN 0360-8352. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.06.030>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835218303103>>.

Citado na p. 114.

DEMARTINI, Melissa et al. A Manufacturing Value Modeling Methodology (MVMM): A Value Mapping and Assessment Framework for Sustainable Manufacturing. In: CAMPANA, Giampaolo et al. (Ed.). **Sustainable Design and Manufacturing 2017**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 98–108. ISBN 978-3-319-57078-5. Citado na p. 79.

DENG, Deqiang et al. A hybrid multiple criteria decision making model of sustainability performance evaluation for Taiwanese Certified Public Accountant firms. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 603–616, 2018. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.107>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618301215>>.

Citado nas pp. 47, 65.

DEVIKA, K.; JAFARIAN, A.; NOURBAKHS, V. Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques. **European Journal of Operational Research**, v. 235, n. 3, p. 594–615, 2014. ISSN 0377-2217. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.032>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221713010163>>.

Citado na p. 114.

DIAS, Sylmara Lopes Francelino Gonã; LABEGALINI, Letãcia; CSILLAG, Joã Mãjrio. Sustentabilidade e cadeia de suprimentos: uma perspectiva comparada de publicaãÑnacionais e internacionais. pt. **Production**, scielo, v. 22, p. 517–533, ago. 2012. ISSN 0103-6513. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-65132012000300012&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132012000300012&nrm=iso)>. Citado na p. 37.

DIAZ-SARACHAGA, Jose Manuel; JATO-ESPINO, Daniel; CASTRO-FRESNO, Daniel. Methodology for the development of a new Sustainable Infrastructure Rating System for Developing Countries (SIRSDEC). **Environmental Science Policy**, v. 69, p. 65–72, 2017. ISSN 1462-9011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.010>.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901116309340>>.

Citado na p. 47.

ESKANDARPOUR, Majid et al. Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. **Omega**, v. 54, p. 11–32, 2015. ISSN 0305-0483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048315000080>>.

Citado nas pp. 39, 46, 50, 52, 99.

FAHIMNIA, Behnam; JABBARZADEH, Armin. Marrying supply chain sustainability and resilience: A match made in heaven. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 91, p. 306–324, 2016. ISSN 1366-5545. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.02.007>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554516000296>>.

Citado na p. 79.

FARLEY, Heather M.; SMITH, Zachary A. **Sustainability: If it's everything, is it nothing?** [S.l.]: Taylor e Francis, jan. 2013. ISBN 9780203799062. DOI:

10.4324/9780203799062. Citado nas pp. 14, 36, 60.

FIKSEL, Joseph et al. The triple value model: a systems approach to sustainable solutions. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 16, n. 4, p. 691–702, abr. 2014. ISSN 1618-9558. DOI: 10.1007/s10098-013-0696-1. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1007/s10098-013-0696-1>>. Citado na p. 36.

FONSECA, João José. **Metodologia da pesquisa científica**. 2. ed. [S.l.]: UEC, 2002. Citado nas pp. 20, 21.

GAN, Vincent J.L.; CHENG, Jack C.P.; LO, Irene M.C. Integrating life cycle assessment and multi-objective optimization for economical and environmentally sustainable supply of aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 76–85, 2016. ISSN

0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.092>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261501820X>>.

Citado na p. 99.

GAO, De et al. From a systematic literature review to integrated definition for sustainable supply chain innovation (SSCI). **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 1518–1538, 2017. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.153>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616320157>>.

Citado na p. 99.

GHENAI, Chaouki; ALBAWAB, Mona; BETTAYEB, Maamar. Sustainability indicators for renewable energy systems using multi-criteria decision-making model and extended SWARA/ARAS hybrid method. **Renewable Energy**, v. 146, p. 580–597, 2020. ISSN

0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.157>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119309978>>.

Citado na p. 47.

GHORABAEE, Mehdi Keshavarz et al. A new hybrid fuzzy MCDM approach for evaluation of construction equipment with sustainability considerations. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 18, n. 1, p. 32–49, 2018. ISSN 1644-9665. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.04.011>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1644966517300638>>.

Citado na p. 47.

GIL, Antonio Carlos. **Metodologia do trabalho científico: procedimentos básicos, pesquisa bibliográfica, projeto e relatório, publicações e trabalhos científicos**. 6. ed. [S.l.]: Atlas, 2007. Citado na p. 22.

GOLD, Stefan; SEURING, Stefan; BESKE, Philip. Sustainable Supply Chain Management and Inter-Organizational Resources: A Literature Review. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, v. 17, p. 230–245, jan. 2009. DOI: 10.1002/csr.207. Citado nas pp. 15, 46.

GOLDENBERG, Mirian. **A arte de pesquisar: como fazer pesquisa qualitativa em ciências sociais**. 2. ed. [S.l.]: Record, 1997. Citado na p. 21.

GOLICIC, Susan L.; SMITH, Carlo D. A Meta-Analysis of Environmentally Sustainable Supply Chain Management Practices and Firm Performance. **Journal of Supply Chain Management**, v. 49, n. 2, p. 78–95, 2013. DOI: 10.1111/jscm.12006. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jscm.12006>. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jscm.12006>>. Citado na p. 14.

GONG, Ruifeng et al. A Bibliometric Analysis of Green Supply Chain Management Based on the Web of Science (WOS) Platform. **Sustainability**, v. 11, n. 12, 2019. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su11123459. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/11/12/3459>>. Citado na p. 79.

GOVINDAN, Kannan; AZEVEDO, Susana G. et al. Impact of supply chain management practices on sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 85, p. 212–225, 2014. Special Volume: Making Progress Towards More Sustainable Societies through Lean and Green Initiatives. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.068>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614005460>>. Citado na p. 60.

GOVINDAN, Kannan; DARBARI, Jyoti Dhingra et al. Fuzzy multi-objective approach for optimal selection of suppliers and transportation decisions in an eco-efficient closed loop supply chain network. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 1598–1619, 2017. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.180>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617313227>>. Citado na p. 47.

GOVINDAN, Kannan; JAFARIAN, Ahmad; NOURBAKHSH, Vahid. Bi-objective integrating sustainable order allocation and sustainable supply chain network strategic design with stochastic demand using a novel robust hybrid multi-objective metaheuristic. **Computers Operations Research**, v. 62, p. 112–130, 2015. ISSN 0305-0548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.12.014>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030505481500009X>>.

Citado na p. 50.

GOVINDAN, Kannan; KHODAVERDI, Roohollah; JAFARIAN, Ahmad. A fuzzy multi criteria approach for measuring sustainability performance of a supplier based on triple bottom line approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 47, p. 345–354, 2013.

Cleaner Production: initiatives and challenges for a sustainable world. ISSN 0959-6526.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.014>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652612002016>>.

Citado nas pp. 47, 66.

GOVINDAN, Kannan; SHANKAR, K. Madan; KANNAN, Devika. Sustainable material selection for construction industry – A hybrid multi criteria decision making approach.

**Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 1274–1288, 2016. ISSN

1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.100>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115007479>>.

Citado nas pp. 47, 66.

GRI. **Diretrizes para sustentabilidade da Global Reporting Initiative**. [S.l.], 2018.

Citado nas pp. 14, 67, 84.

GROSSMANN, Ignacio E.; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, Gonzalo. Scope for the application of mathematical programming techniques in the synthesis and planning of sustainable processes. **Computers Chemical Engineering**, v. 34, n. 9, p. 1365–1376, 2010.

Selected papers from the 7th International Conference on the Foundations of Computer-Aided Process Design (FOCAPD, 2009, Breckenridge, Colorado, USA. ISSN

0098-1354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.11.012>. Disponível

em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135409002841>>.

Citado na p. 48.

HAGHIGHI, S. Motevali; TORABI, S.A.; GHASEMI, R. An integrated approach for performance evaluation in sustainable supply chain networks (with a case study).

**Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 579–597, 2016. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.119>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616310150>>.

Citado na p. 47.

HANAN, Deirdre; BURNLEY, Stephen; COOKE, David. A multi-criteria decision analysis assessment of waste paper management options. **Waste Management**, v. 33, n. 3, p. 566–573, 2013. Special Thematic Issue: Urban Mining. ISSN 0956-053X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.06.007>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X12002772>>.

Citado na p. 51.

HANFIELD, R.B; NICOLS, E.L. **Introduction to supply chain management**. 2. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 1999. Citado na p. 59.

HASSINI, Elkafi; SURTI, Chirag; SEARCY, Cory. A literature review and a case study of sustainable supply chains with a focus on metrics. **International Journal of Production Economics**, v. 140, n. 1, p. 69–82, 2012. Sustainable Development of Manufacturing and Services. ISSN 0925-5273. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.01.042>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527312000576>>.

Citado na p. 99.

HERAVI, Gholamreza; FATHI, Medya; FAEGHI, Shiva. Multi-criteria group decision-making method for optimal selection of sustainable industrial building options focused on petrochemical projects. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2999–3013, 2017. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.168>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616317991>>.

Citado na p. 47.

HUTCHINS, Margot J.; SUTHERLAND, John W. An exploration of measures of social sustainability and their application to supply chain decisions. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 15, p. 1688–1698, 2008. Sustainability and Supply Chain Management. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.001>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652608001455>>.

Citado na p. 81.

HWANG C.L.; YOON, K.. **Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications**. [S.l.]: New York: Springer-Verlag, 1981. Citado na p. 61.

JATO-ESPINO, Daniel et al. A fuzzy stochastic multi-criteria model for the selection of urban pervious pavements. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 15, p. 6807–6817, 2014. ISSN 0957-4174. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.05.008>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417414002887>>.

Citado na p. 47.

JAUHAR, Sunil Kumar; PANT, Millie; NAGAR, Atulya K. Sustainable educational supply chain performance measurement through DEA and differential evolution: A case on Indian HEI. **Journal of Computational Science**, v. 19, p. 138–152, 2017. ISSN 1877-7503. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2016.10.007>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187775031630206X>. Citado na p. 47.

KHALID, Raja et al. Putting sustainable supply chain management into base of the pyramid research. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 20, p. 681–696, set. 2015. DOI: 10.1108/SCM-06-2015-0214. Citado na p. 46.

KIRCHOFF, Jon F.; OMAR, Ayman; FUGATE, Brian S. A Behavioral Theory of Sustainable Supply Chain Management Decision Making in Non-exemplar Firms. **Journal of Supply Chain Management**, v. 52, n. 1, p. 41–65, 2016. DOI: 10.1111/jscm.12098. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jscm.12098>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jscm.12098>. Citado nas pp. 15, 36, 79, 99.

KUO, Tsai Chi et al. Investigating the Influential Factors of Sustainable Supply Chain Management, Using Two Asian Countries as Examples. **Sustainable Development**, v. 25, n. 6, p. 559–579, 2017. DOI: 10.1002/sd.1678. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/sd.1678>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sd.1678>. Citado na p. 36.

LABUSCHAGNE, Carin; BRENT, Alan C. An industry perspective of the completeness and relevance of a social assessment framework for project and technology management in the manufacturing sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 3, p. 253–262, 2008. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.07.028>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652606002800>. Citado na p. 14.

LEKSONO, Eko Budi; SUPARNO, Suparno; VANANY, Iwan. Integration of a Balanced Scorecard, DEMATEL, and ANP for Measuring the Performance of a Sustainable Healthcare Supply Chain. **Sustainability**, v. 11, n. 13, 2019. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su11133626. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/13/3626>. Citado na p. 80.

LIMA-JUNIOR, Francisco Rodrigues; CARPINETTI, Luiz Cesar Ribeiro. Quantitative models for supply chain performance evaluation: A literature review. **Computers Industrial Engineering**, v. 113, p. 333–346, 2017. ISSN 0360-8352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.09.022>. Disponível em:



<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835217304400>>.

Citado na p. 100.

LIU, Aijun et al. A fuzzy three-stage multi-attribute decision-making approach based on customer needs for sustainable supplier selection. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 118043, 2019. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118043>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619329130>>.

Citado nas pp. 47, 66.

LU, Ming-Tsang et al. A hybrid MCDM and sustainability-balanced scorecard model to establish sustainable performance evaluation for international airports. **Journal of Air Transport Management**, v. 71, p. 9–19, 2018. ISSN 0969-6997. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2018.05.008>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969699718300450>>.

Citado nas pp. 47, 66.

LUTHRA, Sunil; MANGLA, Sachin Kumar; KHARB, Ravinder K. Sustainable assessment in energy planning and management in Indian perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 58–73, 2015. ISSN 1364-0321. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.007>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115001525>>.

Citado na p. 47.

MACHARIS, Cathy; TURCK SIN, Laurence; LEBEAU, Kenneth. Multi actor multi criteria analysis (MAMCA) as a tool to support sustainable decisions: State of use. **Decision Support Systems**, v. 54, n. 1, p. 610–620, 2012. ISSN 0167-9236. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.08.008>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923612002047>>.

Citado nas pp. 37, 51.

MAHJOURI, Maryam et al. Optimal selection of Iron and Steel wastewater treatment technology using integrated multi-criteria decision-making techniques and fuzzy logic. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 107, p. 54–68, 2017. ISSN

0957-5820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.01.016>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582017300216>>.

Citado nas pp. 47, 66.

MAHMOUDI, Reza et al. Performance evaluation of thermal power plants considering CO<sub>2</sub> emission: A multistage PCA, clustering, game theory and data envelopment analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 641–650, 2019. ISSN 0959-6526.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.047>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261930736X>>.

Citado nas pp. 47, 101.

MARCONDES, Danilo; SANT'ANNA, Ângelo. Principal component regression-based control charts for monitoring count data. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 85, nov. 2015. DOI: 10.1007/s00170-015-8054-6. Citado nas pp. 32, 83.

MARCONI, Marina; LAKATOS, Eva. **Metodologia do trabalho científico: procedimentos básicos, pesquisa bibliográfica, projeto e relatório, publicações e trabalhos científicos**. [S.l.]: Atlas, 2011. Citado nas pp. 20–22.

MARDANI, Abbas et al. A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 216–256, 2017. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.053>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116311078>. Citado na p. 46.

MARTEL, Jean-Marc; AOUNI, Belaïd. Diverse Imprecise Goal Programming Model Formulations. **Journal of Global Optimization**, v. 12, n. 2, p. 127–138, mar. 1998. ISSN 1573-2916. DOI: 10.1023/A:1008206226608. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1008206226608>. Citado na p. 31.

MARTTUNEN, Mika; LIENERT, Judit; BELTON, Valerie. Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations. **European Journal of Operational Research**, v. 263, n. 1, p. 1–17, 2017. ISSN 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.041>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221717303880>. Citado na p. 80.

MATTIUSI, Alessandro; ROSANO, Michele; SIMEONI, Patrizia. A decision support system for sustainable energy supply combining multi-objective and multi-attribute analysis: An Australian case study. **Decision Support Systems**, v. 57, p. 150–159, 2014. ISSN 0167-9236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dss.2013.08.013>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923613002261>. Citado nas pp. 39, 47, 51, 80, 99, 116.

MCKENNA, R. et al. Combining local preferences with multi-criteria decision analysis and linear optimization to develop feasible energy concepts in small communities. **European Journal of Operational Research**, v. 268, n. 3, p. 1092–1110, 2018. Community Operational Research: Innovations, internationalization and agenda-setting applications. ISSN 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.036>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221718300729>. Citado na p. 47.

MEDINECKIENE, M. et al. Multi-criteria decision-making system for sustainable building assessment/certification. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 15, n. 1, p. 11–18, 2015. ISSN 1644-9665. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.09.001>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1644966514001265>>.

Citado na p. 47.

MOHAMMED, A. et al. An integrated methodology for a sustainable two-stage supplier selection and order allocation problem. **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 99–114, 2018. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.131>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618311582>>.

Citado nas pp. 47, 66.

MOUSAVI-NASAB, Seyed Hadi; SOTOUDEH-ANVARI, Alireza. A new multi-criteria decision making approach for sustainable material selection problem: A critical study on rank reversal problem. **Journal of Cleaner Production**, v. 182, p. 466–484, 2018. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.062>.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618303688>>.

Citado nas pp. 47, 66.

MURA, Matteo et al. The Evolution of Sustainability Measurement Research.

**International Journal of Management Reviews**, v. 20, n. 3, p. 661–695, 2018. DOI:

10.1111/ijmr.12179. Disponível em:

<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ijmr.12179>>. Citado na

p. 80.

NOGUÉS, Soledad; GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, Esther; CORDERA, Rubén. Planning regional sustainability: An index-based framework to assess spatial plans. Application to the region of Cantabria (Spain). **Journal of Cleaner Production**, v. 225, p. 510–523, 2019. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.328>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619310443>>.

Citado na p. 47.

ONU, Pascal U. et al. Evaluation of sustainable acid rain control options utilizing a fuzzy TOPSIS multi-criteria decision analysis model frame work. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 612–625, 2017. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.065>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616314068>>.

Citado nas pp. 47, 66.

PADHI, Sidhartha S.; PATI, Rupesh K.; RAJEEV, A. Framework for selecting sustainable supply chain processes and industries using an integrated approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 969–984, 2018. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.306>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618306449>. Citado na p. 47.

PAGELL, MARK; WU, ZHAOHUI. BUILDING A MORE COMPLETE THEORY OF SUSTAINABLE SUPPLY CHAIN MANAGEMENT USING CASE STUDIES OF 10 EXEMPLARS. **Journal of Supply Chain Management**, v. 45, n. 2, p. 37–56, 2009. DOI: 10.1111/j.1745-493X.2009.03162.x. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1745-493X.2009.03162.x>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-493X.2009.03162.x>. Citado na p. 36.

PANAGIOTAKOPOULOS, Panagiotis; ESPINOSA, Angela; WALKER, Jon. Integrated sustainability management for organizations. **Kybernetes**, v. 44, p. 984–1004, jun. 2015. DOI: 10.1108/K-12-2014-0291. Citado na p. 79.

POUREBRAHIM, Sharareh et al. Application of VIKOR and fuzzy AHP for conservation priority assessment in coastal areas: Case of Khuzestan district, Iran. **Ocean Coastal Management**, v. 98, p. 20–26, 2014. ISSN 0964-5691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.05.009>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569114001513>. Citado na p. 47.

RABBANI, Arefeh et al. Proposing a new integrated model based on sustainability balanced scorecard (SBSC) and MCDM approaches by using linguistic variables for the performance evaluation of oil producing companies. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 16, p. 7316–7327, 2014. ISSN 0957-4174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.05.023>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417414003030>. Citado na p. 47.

RAJEEV, A. et al. Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 299–314, 2017. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.026>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617309514>. Citado nas pp. 99–101.

RAMEZANKHANI, M.J.; TORABI, S. Ali; VAHIDI, F. Supply chain performance measurement and evaluation: A mixed sustainability and resilience approach. **Computers Industrial Engineering**, v. 126, p. 531–548, 2018. ISSN 0360-8352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.09.054>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835218304698>>.

Citado na p. 100.

REN, Jingzheng; LÜTZEN, Marie. Fuzzy multi-criteria decision-making method for technology selection for emissions reduction from shipping under uncertainties.

**Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 40, p. 43–60, 2015. ISSN 1361-9209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.07.012>.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920915001042>>.

Citado nas pp. 47, 65.

RENCHER, Alvin C. **Methods of multivariate analysis**. 2. ed. [S.l.]: Wiley Interscience, 2002. Citado nas pp. 32, 83.

RODGER, James Allen; GEORGE, James A. Triple bottom line accounting for optimizing natural gas sustainability: A statistical linear programming fuzzy ILOWA optimized sustainment model approach to reducing supply chain global cybersecurity vulnerability through information and communications technology. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 1931–1949, 2017. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.089>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616319345>>.

Citado na p. 48.

ROSÉN, Lars et al. SCORE: A novel multi-criteria decision analysis approach to assessing the sustainability of contaminated land remediation. **Science of The Total Environment**, v. 511, p. 621–638, 2015. ISSN 0048-9697. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.058>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969714017604>>.

Citado na p. 47.

ROSTAMZADEH, Reza et al. Application of fuzzy VIKOR for evaluation of green supply chain management practices. **Ecological Indicators**, v. 49, p. 188–203, 2015. ISSN 1470-160X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.045>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X14004774>>.

Citado nas pp. 47, 65.

SAATY, Thomas. Decision making with the Analytic Hierarchy Process. **Int. J. Services Sciences Int. J. Services Sciences**, v. 1, p. 83–98, jan. 2008. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590. Citado nas pp. 28, 37, 38, 48, 103.

SARKIS, Joseph; ZHU, Qinghua; LAI, Kee-hung. An organizational theoretic review of green supply chain management literature. **International Journal of Production Economics**, v. 130, n. 1, p. 1–15, 2011. ISSN 0925-5273. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.11.010>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527310004391>>.

Citado nas pp. 59, 60.

SEURING, Stefan. A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. **Decision Support Systems**, v. 54, n. 4, p. 1513–1520, 2013. Rapid Modeling for Sustainability. ISSN 0167-9236. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.053>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923612001741>>.

Citado nas pp. 39, 100.

SEURING, Stefan; MÜLLER, Martin. Core issues in sustainable supply chain management – a Delphi study. **Business Strategy and the Environment**, v. 17, n. 8, p. 455–466, 2008. DOI: 10.1002/bse.607. eprint:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/bse.607>. Disponível em:

<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bse.607>>. Citado nas pp. 14, 46, 60, 99.

SHUKLA, Apratul; DESHMUKH, S G; KANDA, Arun. Environmentally responsive supply chains: Learning from the Indian auto sector. **Journal of Advances in Management Research**, v. 6, p. 154–171, ago. 2009. DOI:

10.1108/09727980911007181. Citado na p. 60.

SOLANGI, Yasir Ahmed et al. Evaluating the strategies for sustainable energy planning in Pakistan: An integrated SWOT-AHP and Fuzzy-TOPSIS approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 117655, 2019. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117655>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619325053>>.

Citado nas pp. 47, 66.

SOLEIMANI, Hamed et al. Fuzzy multi-objective sustainable and green closed-loop supply chain network design. **Computers Industrial Engineering**, v. 109, p. 191–203, 2017. ISSN 0360-8352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.04.038>.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835217301845>>.

Citado na p. 114.

SREEKUMAR, V.; MOHAN, Raj. Supply chain sustainability strategy selection using integrated multi-criteria decision-making method. **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 31, p. 483, jan. 2018. DOI:

10.1504/IJLSM.2018.096085. Citado na p. 66.

SRIVASTAVA, Samir K. Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. **International Journal of Management Reviews**, v. 9, n. 1, p. 53–80, 2007.

DOI: 10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x. eprint:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x>.

Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x>>. Citado na p. 60.

STARIK, Mark; KANASHIRO, Patricia. Toward a Theory of Sustainability Management: Uncovering and Integrating the Nearly Obvious. **Organization & Environment**, v. 26, n. 1, p. 7–30, 2013. DOI: 10.1177/1086026612474958. Citado na p. 59.

STINDT, Dennis. A generic planning approach for sustainable supply chain management - How to integrate concepts and methods to address the issues of sustainability? **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 146–163, 2017. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.126>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261730570X>>. Citado na p. 99.

TABATABAEE, Sanaz et al. An assessment model of benefits, opportunities, costs, and risks of green roof installation: A multi criteria decision making approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 238, p. 117956, 2019. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117956>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619328264>>. Citado na p. 47.

TEBALDI, Letizia; BIGLIARDI, Barbara; BOTTANI, Eleonora. Sustainable Supply Chain and Innovation: A Review of the Recent Literature. **Sustainability**, v. 10, n. 11, 2018. ISSN 2071-1050. DOI: 10.3390/su10113946. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/10/11/3946>>. Citado na p. 79.

THIELE, Leslie Paul. **Sustainability**. 1. ed. [S.l.]: Polity, 2013. Citado na p. 59.

THIES, Christian et al. Operations research for sustainability assessment of products: A review. **European Journal of Operational Research**, v. 274, n. 1, p. 1–21, 2019. ISSN 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.04.039>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722171830359X>>. Citado na p. 46.

TONELLI, Flavio et al. A review of decision-support tools and performance measurement and sustainable supply chain management. **International Journal of Production Research**, v. 53, p. 1–22, jul. 2014. DOI: 10.1080/00207543.2014.939239. Citado na p. 46.

TOUBOULIC, Anne; WALKER, Helen. Theories in sustainable supply chain management: A structured literature review. **International Journal of Physical Distribution Logistics Management**, v. 45, mar. 2015. DOI: 10.1108/IJPDLM-05-2013-0106. Citado na p. 46.

TRIVINOS, Augusto Nivaldo Silva. **Introdução à Pesquisa em Ciências Sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. 1. ed. [S.l.]: Atlas, 1987. Citado na p. 22.

TSAO, Yu-Chung et al. Designing sustainable supply chain networks under uncertain environments: Fuzzy multi-objective programming. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 1550–1565, 2018. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.272>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617325763>>.

Citado na p. 114.

VIVAS, Renato et al. Integrated method combining analytical and mathematical models for the evaluation and optimization of sustainable supply chains: A Brazilian case study.

**Computers Industrial Engineering**, p. 105670, 2019. ISSN 0360-8352. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.044>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835219300476>>.

Citado nas pp. 47, 66, 81.

WANG, Bochao; BRÊME, Séverin; MOON, Young B. Hybrid modeling and simulation for complementing Lifecycle Assessment. **Computers Industrial Engineering**, v. 69, p. 77–88, 2014. ISSN 0360-8352. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.12.016>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835214000023>>.

Citado na p. 50.

WANG, Zhenfeng; XU, Guangyin et al. Polygeneration system and sustainability: Multi-attribute decision-support framework for comprehensive assessment under uncertainties. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 1122–1137, 2017. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.089>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261731805X>>.

Citado nas pp. 47, 66.

WCED. **World Commission on Environment and Development**. [S.l.], 1987. Citado na p. 59.

WINTER, Marc; KNEMEYER, A. Exploring the Integration of Sustainability and Supply Chain Management: Current State and Opportunities for Future Inquiry. **International Journal of Physical Distribution Logistics Management**, v. 43, jan. 2013. DOI:

10.1108/09600031311293237. Citado na p. 46.

WU, Kuo-Jui et al. Enhancing corporate knowledge management and sustainable development: An inter-dependent hierarchical structure under linguistic preferences.

**Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, p. 560–579, 2019. ISSN

0921-3449. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.015>. Disponível

em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344919301211>>.

Citado nas pp. 47, 80.



ZHANG, Hao; HAAPALA, Karl R. Integrating sustainable manufacturing assessment into decision making for a production work cell. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 52–63, 2015. Decision-support models and tools for helping to make real progress to more sustainable societies. ISSN 0959-6526. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.038>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614000511>>.

Citado na p. 51.

ZHANG, Qi et al. Sustainable supply chain optimisation: An industrial case study.

**Computers Industrial Engineering**, v. 74, p. 68–83, 2014. ISSN 0360-8352. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.05.002>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835214001478>>.

Citado na p. 100.

ZHANG, Shuzhu et al. Multi-objective optimization for sustainable supply chain network design considering multiple distribution channels. **Expert Systems with Applications**, v. 65, p. 87–99, 2016. ISSN 0957-4174. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.08.037>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417416304365>>.

Citado na p. 100.

ZHU Q., Sarkis J.; GENG, Y. Green supply chain management in China: pressures, practices and performance. **International Journal of Operations Production Management**, v. 25, n. 5, p. 449–468, 2005. Citado na p. 60.

ZOLFANI, Sarfaraz Hashemkhani et al. Evaluating construction projects of hotels based on environmental sustainability with MCDM framework. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 1, p. 357–365, 2018. ISSN 1110-0168. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.11.002>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016816303003>>.

Citado na p. 47.

**UFBA**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI**

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA  
CEP: 40.210-630  
Telefone: (71) 3283-9800  
E-mail: [pei@ufba.br](mailto:pei@ufba.br)  
Home page: <http://www.pei.ufba.br>

