PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS (PPGEPS)

MAGNO PAIVA HIPPERTT

DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE APOIO A DECISÃO PARA A SELEÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS (CLÁSSICOS OU COLABORATIVOS) APLICADO A SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEL

CURITIBA
2020

MAGNO PAIVA HIPPERTT

DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE APOIO A DECISÃO PARA A SELEÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS (CLÁSSICOS OU COLABORATIVOS) APLICADO A SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, para a obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Luis Szejka
Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Rocha Loures

CURITIBA

2020

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/PUCPR
Biblioteca Central
Edilene de Oliveira dos Santos CRB-9/1636

H667d
2020

Hippertt, Magno Paiva
Desenvolvimento de um método de apoio a decisão para a seleção de robôs industriais (clássicos ou colaborativos) aplicado a sistemas de manufatura flexível / Magno Paiva Hippertt; orientador, Anderson Luis Szejka; coorientador, Eduardo Rocha Loures. -- 2020
141 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2020
Bibliografia: f. 132-141

1. Engenharia da produção. 2. Robôs industriais. 3. Processo decisório. 4. Inovações tecnológicas. I. Szejka, Anderson Luis. II. Loures, Eduardo de Freitas Rocha. III. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. IV. Título

CDD. 20. ed. – 658.78

Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas

TERMO DE APROVAÇÃO

Magno Paiva Hippertt

DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE APOIO A DECISÃO PARA A SELEÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS CLÁSSICOS OU COLABORATIVOS APLICADOS A SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEL

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Presidente da Banca
Prof. Dr. Anderson Luis Szejka
(Orientador)

Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures
(Coorientador)

Prof. Dr. Osiris Canciglieri Junior
(Membro Interno)

Prof. Dr. Antonio Batocchio
(Membro Externo)

Curitiba, 24 de setembro de 2020.

Rua Imaculada Conceição, 1155 - Prado Velho – CEP: 80215-901 - Curitiba - Paraná - Brasil
Tel: +55 41 3271-1333 - Fax: +55 41 3271-1345 www.pucpr.br/ppgeps

RESUMO

Com a 4.ª Revolução Industrial, novas tecnologias e métodos estão emergindo para aprimorar a coleta de dados e auxiliar nos processos decisórios nas organizações. Uma das tecnologias que evolui com a Indústria 4.0 é a do robô colaborativo. Um robô colaborativo, ou COBOT, é uma máquina projetada para trabalhar de forma colaborativa com pessoas muitas vezes sem a necessidade de dispositivos externos de segurança, atuando onde os seus antecessores não conseguiriam. Os sistemas de manufaturas alinhados ao paradigma da Indústria 4.0 requerem cada vez mais flexibilidade e customização em massa. Em paralelo, há um crescimento cada vez mais de modelos, especificações e funcionalidades de robôs, podendo ser estes clássicos ou colaborativos. Estes novos cenários tornam a escolha de um robô que melhor se adéque a uma determinada tarefa mais complexa e a escolha incorreta de um robô pode impactar diretamente na competitividade da empresa. Desta forma, este trabalho está propondo um método de apoio a tomada de decisão para a seleção de robôs industriais (clássicos e colaborativos) aplicados em sistema de manufatura avançados. Este método irá sistematizar a informação na qual tomadores de decisão poderão seguir para terem resultados mais acurados e fundamentados. Para a construção do método, o trabalho iniciou com uma revisão da literatura de robôs, se aprofundando na robótica clássica e colaborativa e dando-se atenção aos autores que já utilizaram métodos de tomada de decisão multicritério em processos decisórios no ramo da robótica industrial. A aplicação da proposta de sistema para decisão de robôs industriais clássicos ou colaborativos foi feita por meio dos casos experimentais em uma empresa do setor automobilístico. O primeiro caso tratou da escolha de um robô colaborativo para um laboratório de inovação cujo princípio de existência é formar colaboradores em novas tecnologias e fomentar a inovação e, o segundo caso tratou da escolha de um robô para checagem de peças em uma linha de *kitting*. Por meio dos casos experimentais foram avaliadas as diferenças entre a escolha da empresa e o modelo sugerido pelo sistema, o que demonstrou que os robôs propostos pelo modelo de fato eram os melhores para a aplicação. Por meio do trabalho foi possível verificar que, embora sejam feitos estudos na área da decisão em robôs industriais, não existe uma forma geral ou caminho no qual tomadores de decisão possam seguir para decidir, e sim autores trabalhando em casos, modelos e métodos específicos. O presente trabalho fornece uma abordagem geral considerando o espectro da robótica colaborativa, a qual insere novos elementos os quais exigem que abordagens decisórias passadas sejam revisadas. O presente trabalho não considerou o critério custo, sendo assim é interessante que em trabalhos futuros seja considerado, bem como uma lista maior de requisitos mínimos da aplicação.

Palavras-chave: Seleção de Robôs, Robôs Clássicos Industriais, Robôs Colaborativos Industriais, Modelo de Apoio a Decisão.

ABSTRACT

With the 4th Industrial Revolution, new technologies and methods are emerging to improve data collection and assist in decision-making processes in organizations. One of the technologies that have evolved with Industry 4.0 is the collaborative robot. A collaborative robot, or COBOT, is a machine designed to work collaboratively with people often without the need for external safety devices, acting where their predecessors would not have been able to. Manufacturing systems aligned with the Industry 4.0 paradigm increasingly require flexibility and mass customization. In parallel, there is an increasing growth in models, specifications, and features of robots, which can be classic or collaborative. These new scenarios have made the choice of a robot that best suits a given more complex task and the incorrect choice of a robot can directly impact the company's competitiveness. In this way, this work is proposing a method to support decision making for the selection of industrial robots (classic and collaborative) applied in advanced manufacturing systems. This method will systematize the information that decision-makers will be able to follow to have more accurate and grounded results. For the construction of the method, the work started with a review of the literature of robots, going deeper into classic and collaborative robotics and paying attention to authors who have already used multicriteria decision-making methods in decision-making processes in the field of industrial robotics. The validation of the proposed system for deciding on classic or collaborative industrial robots was done through experimental cases in a company in the automotive sector. The first case dealt with the choice of a collaborative robot for an innovation laboratory whose principle of existence is to train employees in new technologies and foster innovation, and the second case dealt with the choice of a robot for checking parts in a kitting line. Through the experimental cases, the differences between the choice of the company and the model suggested by the system were evaluated, which demonstrated that the robots proposed by the model were the best for the application. Through the work, it was possible to verify that, although studies are made in the area of decision in industrial robots, there is no general way or way in which decision-makers can follow to make a decision, but authors working in specific cases, models, and methods. The present work provides a general approach considering the spectrum of collaborative robotics, which inserts new elements that demand that past decision-making approaches be reviewed. The present work did not consider the cost criterion, so it is interesting that in future works it is taken into account, as well as a larger list of minimum application requirements.

Keywords: robot Selection, Classical Industrial Robot, Collaborative Industrial Robot, Multi-Criteria Decision-Making.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Arquitetura da Metodologia de Pesquisa da adotado no trabalho. 18
Figura 2 - Diagrama de vertical para Robôs.....22
Figura 3 - Elos e juntas 26
Figura 4 - Tipos de Juntas.....27
Figura 5 - Robô Retangular ou Cartesiano.....28
Figura 6 - Robô Cilíndrico 28
Figura 7 - Robô Polar Esférico 29
Figura 8 - Robô Articulado.....29
Figura 9 - Robô SCARA 30
Figura 10 - Robô Paralelo 30
Figura 11 - Análise de Riscos Robô Clássico.....35
Figura 12 - Análise de Riscos Robô Colaborativo 36
Figura 13 - Modo de Colaboração: Parada Monitorada de Segurança 38
Figura 14 - Modo de Colaboração: ensino Manual.....39
Figura 15 - Modo de Colaboração: Monitoramento de Velocidade e Separação 40
Figura 16 - Modo de Colaboração: Limitação de Potência e Força.....40
Figura 17 - Processo do MCDA.....46
Figura 18 - Assistentes mais utilizados 51
Figura 19 - Exemplo de Estrutura AHP 54
Figura 20 - Critério do Tipo 1.....67
Figura 21 - Função do Tipo 2 68
Figura 22 – Função do Tipo 3 69
Figura 23 - Função do Tipo 4 69
Figura 24 - Função do Tipo 5 70
Figura 25 - Função do Tipo 6 71
Figura 26 - Projeção no plano GAIA.....74
Figura 27 - Plano GAIA 75
Figura 28 - Plano HB.....76
Figura 29 - Problema *Soft* 76
Figura 30 - Problema *Hard* 77
Figura 31 - Robôs Industriais 80
Figura 32 - Modelo Conceitual do Método 83

Figura 33 - Grupo de Critérios 88
Figura 34 - Extrato da tabela de decisão 96
Figura 35 - Aba de estudos Visual PROMETHEE 97
Figura 36 – Dimensões do Laboratório 102
Figura 37 - Inclusão da Base de robôs e pesos no Visual PROMETHEE Caso Experimental 1 109
Figura 38 - Aplicação PROMETHEE *Table* Caso Experimental 1 110
Figura 39 - Aplicação Action Profile Caso Experimental 1: UR10 111
Figura 40 - Aplicação Action Profile Caso Experimental 1: cR15iA 111
Figura 41 - Aplicação Action Profile Caso Experimental 1 LBR IIWA 14 R820 112
Figura 42 - Local da Aplicação 117
Figura 43 - Inclusão da Base de robôs e pesos no Visual PROMETHEE Caso Experimental 2 123
Figura 44 - Aplicação PROMETHEE *Table* Caso Experimental 2 124
Figura 45 - Aplicação *Action Profile* Caso Experimental 2: UR10 125
Figura 46 - Aplicação *Action Profile* Caso Experimental 2: LBR IIWA 14 R820 125
Figura 47 - Aplicação *Action Profile* Caso Experimental 2 LBR IIWA 7 R800 126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores da Escala Fundamental 53
Tabela 2 - Comparação em pares 1.....55
Tabela 3 - Comparação em pares 2.....55
Tabela 4 - Comparação em pares 3.....55
Tabela 5 - Comparação em pares 4.....55
Tabela 6 - Normalização 1 56
Tabela 7 - Normalização 2 57
Tabela 8 - Normalização 3 57
Tabela 9 - Normalização 4 57
Tabela 10 - Pesos globais 1.....57
Tabela 11 - Pesos globais 2.....58
Tabela 12 - Pesos globais 3.....58
Tabela 13 - Matriz de Resultados.....58
Tabela 14 - Métodos ELECTRE.....61
Tabela 15 - Tabela de Performance.....62
Tabela 16 - Autores nos métodos mais usados 81
Tabela 17 - Método de MUDGE.....91
Tabela 18 - MUDGE Preenchido.....92
Tabela 19 - Atribuição de valores a critérios não-funcionais.....93
Tabela 20 - Priorização dos Clusters Caso Experimental 1 105
Tabela 21 - Priorização dos Clusters Caso Experimental 1: resultado.....105
Tabela 22 - Priorização do critério Flexibilidade Caso Experimental 1.....106
Tabela 23 - Priorização do critério Flexibilidade Caso Experimental 1: resultado...107
Tabela 24 - Priorização do critério Interface Homem-Máquina Caso Experimental 1 107
Tabela 25 - Priorização do critério Flexibilidade de prog. Caso Experimental 1: resultado.....108
Tabela 26 - Priorização dos Clusters Caso Experimental 2 120
Tabela 27 - Priorização dos Clusters Caso Experimental 2: resultado.....120
Tabela 28 - Priorização do critério Flexibilidade Caso Experimental 2.....121
Tabela 29 - Priorização do critério Flexibilidade Caso Experimental 2: resultado...121

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Robôs Pessoais/Domésticos.....23
Quadro 2 - Robôs de Serviço Profissional 24
Quadro 3 - Comparativo Robô Clássico x Colaborativo 33
Quadro 4 - Robôs Colaborativos vs clássicos.....34
Quadro 5 - Tabela de Análise de riscos 35
Quadro 6 - Critérios de seleção de robôs utilizados pela literatura 44
Quadro 7 - Revisão dos Métodos de Tomada de Decisão. 47
Quadro 8 - Tabela classificação da base de Robos.....93
Quadro 9 - Resumo Requisitos mínimos da aplicação Caso Experimental 1 103
Quadro 10 - Resumo Requisitos mínimos da aplicação Caso Experimental 2 117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	*Associação Brasileira de Normas Técnicas*
AGV	*Automated Guided Vehicles*
AHP	*Analytic Hierarchy Process*
CBR	*Case-Based Reasoning*
COBOT	*Collaborative Robot*
DBA	*Distance Based Approach*
DEA	*Data Envelopment Analysis*
ELECTRE	*Elimination Et Choice Translating Reality*
etc	E Outras Coisas
GP	*Goal Programming*
i.e	Isto É
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFA	*International Federation of Robotics*
IHM	Interface Homem Máquina
ISO	*International Organization for Standardization*
LBR	Robô de construção leve
MAUT	*Multi-Attribute Utility Theory*
MCDA	*Multiple Criteria Decision Analysis*
MCDM	*Multiple Criteria Decision Making*
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
R.U.R.	Robôs Universais de Rossum
RGV	*Rail Guided Vehicles*
RIA	*Robotic Industries Association*
SAW	*Simple Additive Weighting*
SKU	*Stock Keeping Unit*
SMART	*Simple Multi-Attribute Rating Technique*
TOPSIS	*Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solutions*
UR	*Universal Robots*
VIKOR	*Visekriterijumsko Kompromisno Rangiranje*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO 14
1.2 OBJETIVOS 15
1.2.1 Objetivo Geral 15
1.2.2 Objetivos Específicos 15
1.3 JUSTIFICATIVA 16
1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 17
2 REVISÃO DA LITERATURA 20
2.1 FUNDAMENTOS DE ROBÔS 20
2.1.1 Robôs segundo ISO 8373 21
2.1.1.1 Robôs de Serviço 22
2.1.1.2 Dispositivos Robóticos 25
2.1.1.3 Robôs Industriais 25
2.1.2 Robôs Articulados Colaborativos vs Robôs Articulados Clássicos 31
2.1.3 Modos de Colaboração 37
2.1.3.1 Parada Monitorada de Segurança 37
2.1.3.2 Ensino Manual 38
2.1.3.3 Monitoramento de Velocidade e Separação 39
2.1.3.4 Limitação de Potência e Força 40
2.2 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS ROBÔS 40
2.3 MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO 44
2.3.1 ANALYTIC HIERARCHY PROCESS 52
2.3.1.1 Desenvolvimento do método AHP 54
2.3.2 *TECHNIQUE FOR ORDER PREFERENCES BY SIMILARITY TO IDEAL SOLUTIONS* (TOPSIS) 58
2.3.3 ELECTRE E PROMETHEE 60
2.3.3.1 ELECTRE 60
2.3.3.2 PROMETHEE 65
2.3.3.2.1 PROMETHEE I (*RANKING* PARCIAL) 71
2.3.3.2.2 PROMETHEE II (*RANKING* COMPLETO) 72
2.3.3.2.3 PROMETHEE GAIA 74
2.3.3.2.4 PROMETHEE VI FERRAMENTA SENSITIVA (Cérebro Humano) 75

2.3.3.2.5 PROMETHEE V (MCDA sob restrições) 77
3 PROPOSTA CONCEITUAL DO MÉTODO DE APOIO A DECISÃO PARA A SELEÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS (CLÁSSICOS OU COLABORATIVOS) APLICADO A SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEL 79
3.1 ESPAÇO PROBLEMA DA APLICAÇÃO ROBÔS 79
3.2 ARQUITETURA CONCEITUAL DO MÉTODO DE APOIO A DECISÃO PARA A SELEÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS (CLÁSSICOS OU COLABORATIVOS) APLICADO A SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEL 82
4 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE APOIO A DECISÃO PARA A SELEÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS (CLÁSSICOS OU COLABORATIVOS) APLICADO A SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEL 85
4.1 BASE DE CRITÉRIOS 85
4.2 AGRUPAMENTO DOS CRITÉRIOS 87
4.3 PRIORIZAÇÃO DOS CLUSTERS 90
4.4 BASE DE ROBOS 93
4.5 REQUISITOS MÍNIMOS DA APLICAÇÃO 94
4.6 APLICAÇÃO DO PROMETHEE 95
5 CASOS DE APLICAÇÃO 99
5.1 CASO EXPERIMENTAL I – ESCOLHA DE ROBÔ PARA LABORATÓRIO DE INOVAÇÃO 99
5.1.1 Requisitos mínimos da Aplicação 99
5.1.2 Filtragem inicial dos Robôs 103
5.1.3 Escolha dos critérios de decisão e aplicação do método de MUDGE 103
5.1.4 Aplicação do PROMETHEE para rankeamento dos Robôs 108
5.1.5 Discussão dos Resultados 112
5.2 CASO EXPERIMENTAL II – IMPLANTAÇÃO DE ROBÔ PARA CHECAGEM DE PEÇAS EM *KITTING* 114
5.2.1 Requisitos mínimos da Aplicação 114
5.2.2 Filtragem inicial dos Robôs 118
5.2.3 Escolha dos critérios de decisão e aplicação do método de MUDGE 118
5.2.4 Aplicação do PROMETHEE para rankeamento dos Robôs 122
5.2.5 Discussão dos Resultados 126
5.3 ANÁLISE DE RESULTADOS 127
6 CONCLUSÃO 129

6.1 PERPECTIVAS FUTURAS.....130
REFERÊNCIAS.....128

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria de manufatura tem sido desafiada a repensar os seus processos produtivos no intuito de produzir produtos cada vez mais customizados e de alta qualidade a um custo atrativo. Desta forma, uma nova revolução industrial tem emergido, a qual busca o estabelecimento de produtos inteligentes e processos produtivos conectados e autônomos (Brettel, Friederichsen, Keller, & Rosenberg, 2014).

Essa nova revolução, conhecida por 4ª Revolução Industrial ou também chamada de Indústria 4.0 (i.e., aplicação intensiva de tecnologia da informação e telecomunicações), é baseada em 9 pilares: robótica autônoma e colaborativa (também conhecida como robótica avançada), big data, realidade aumentada, manufatura aditiva, computação em nuvem, ciber segurança, internet das coisas, integração de sistemas e simulação (Li, 2018) (Schwab, 2017).

A robótica autônoma e colaborativa tem se destacado nesta revolução, pois contribuem para processos produtivos com a facilidade de implantação e permitem o trabalho colaborativo entre robô e humano. Como dito em (United States of America Patente Nº 5,952,796) o trabalho humano com robôs permite desempenhar tarefas que antes não era permitido, como movimentação de cargas ou atividades repetitivas. Além disso, o trabalho colaborativo entre robô e ser humano permite tarefas complexas que somente o robô não conseguiria desempenhar como a troca de uma peça defeituosa, o qual o robô não foi programado para perceber, mas o ser humano consegue desempenhar. Isso garante que sem precisar de uma parada na produção, ou uma reprogramação completa, o robô volte a funcionar.

Em um cenário de alta competitividade, escolhas ágeis e com precisão são extremamente importantes, principalmente na área da robótica os quais os robôs têm um ciclo de vida longo, são extremamente caros e se não forem escolhidos da forma correta, não desempenharam a atividade da forma correta. Desta forma, como fundamentar uma escolha e garantir a vantagem competitiva neste novo cenário da Indústria 4.0? Para isso, se torna necessário o uso de abordagens de auxílio a tomada de decisão bem como uma abordagem pelo qual qualquer tomador de decisão possa seguir de modo a tomar uma escolha mais precisa.

Com esse modelo, considerando toda a revisão sobre robôs, critérios e métodos utilizados pela literatura, é esperado que as escolhas feitas pelos gestores

sejam mais assertivas, com fundamentação matemática e, consequentemente, reduzindo possíveis prejuízos de uma seleção incorreta.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

Quando uma demanda chega a um departamento de engenharia responsável pela instalação de processos de automação, esse setor deve procurar intender a situação na totalidade, propor soluções que sanem a demanda e esperar uma resposta dos setores que vão financiar as soluções. Após liberada a verba para a equipe de automação, esta utiliza-se de seus conhecimentos para a seleção das tecnologias que serão utilizadas no projeto. Devem ser identificados e selecionados os robôs mais adequados para o projeto, com custo mínimo e capacidade de aplicação específica (Chatterjee, Athawale, & Chakraborty, 2010).

A partir disso, todas as tecnologias que podem ser utilizadas para a solução dos problemas apresentados, começam a ser estudadas e simuladas. Essa etapa é extremamente complexa e é um dos problemas mais desafiadores no ambiente de fabricação em tempo real (Chatterjee, Athawale, & Chakraborty, 2010). É uma etapa do projeto que requer tempo, conhecimento e reuniões constantes por parte dos engenheiros visto que robôs com capacidades e especificações imensamente diferentes estão disponíveis (Rao, Patel, & Parnichkun, 2011). É uma questão complexa, multivariável, e que não engloba apenas as características técnicas do equipamento; muitos atributos qualitativos devem ser considerados. Essas categorias de atributos tornam o processo de avaliação difícil e vago (Kahraman, Çevik, Ates, & Gülbay, 2007).

O tempo é custoso, mas os erros cometidos por um planejamento e implantação de uma tecnologia errada, são ainda mais custosos. Um robô selecionado de forma inadequada pode afetar adversamente a competitividade da empresa, tanto em relação à produtividade da fábrica, quanto em relação à qualidade dos produtos (Rao, Patel, & Parnichkun, 2011).

No ramo da robótica industrial articulada, são tomadas decisões baseadas em, mas não se limitando à: graus de liberdade do robô, *payload*, aplicação (solda, *pick and place*, carga, etc), conhecimento técnico da equipe sobre o robô e alcance. Além dessas, com o avanço de uma nova revolução industrial, os Robôs Colaborativos, também conhecidos como *COBOT*s, passam a ser uma nova alternativa para

implantações. Escolher um robô para um ambiente de produção e aplicação industrial particular, dado o grande número de alternativas se tornou uma tarefa complicada (Sen, Datta, Patel, & Mahapatra, 2015). (Chatterjee, Athawale, & Chakraborty, 2010) tem a mesma opinião sobre a dificuldade da seleção de robôs, mas, segundo eles, ela tornou-se muito mais complicada devida à crescente complexidade, recursos avançados e instalações que são continuamente incorporadas aos robôs por diferentes fabricantes.

Com essas inovações, mas especificamente os robôs colaborativos, novos critérios como segurança e ergonomia podem impactar no processo de seleção de um robô. Os COBOTs podem sanar ambos critérios de segurança e ergonomia, visto que são projetados para trabalhar com humanos para produção ou criação de produto, representando grande impacto nas indústrias como elementos de solução para os requisitos impostos (Prutz, 2018) (Akella, et al., 1999) (Cherubini, Passama, Crosnier, Lasnier, & Fraisse, 2016).

Com inúmeros fatores que afetam uma implantação, torna-se imprescindível o uso de modelos e métodos que possam dar suporte à tomada de decisão por parte dos robotistas, reduzindo gastos na parte de planejamento e aumentando a competitividade da empresa. Sendo assim, *é possível propor um método multicritério que forneça dados suficientes e um caminho no qual tomadores de decisão na área da robótica industrial possam seguir de modo a escolher de forma assertiva um robô clássico ou colaborativo?*

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é propor um método de apoio à seleção de robôs industriais clássicos ou colaborativos baseado na sistematização da informação e critérios, bem como nas técnicas de Multicritério de apoio a Tomada de Decisão (MMAD). Desta forma, este modelo subsidiará o tomador de decisão com informações precisas da literatura e irá fornecer um caminho pelo qual a decisão possa seguir.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

a) Realizar uma revisão bibliográfica identificando as principais diferenças e aplicações para os robôs clássicos e robôs colaborativos;
b) Estudar e identificar as variáveis e/ou critério envolvidos durante o processo de seleção de robôs;
c) Estudar os métodos de suporte a tomada de decisão;
d) Propor um método de tomada de decisão para a seleção de robôs industriais clássicos ou colaborativos baseado nos métodos multicritérios de tomada de decisão;
e) Analisar os resultados alcançados na aplicação do método proposto por meio de dois estudos de casos industriais.

1.3 JUSTIFICATIVA

Dados da *International Federation of robotics* (IFA, 2018) apontam que o volume anual de vendas de robôs industriais aumentou em 114% de 2013 a 2017. O número de vendas de robôs industriais foi de mais de 380 mil unidades em 2017, que comparados com o ano anterior, 294 mil, representam um aumento de cerca de 30% nas vendas. Ainda segundo a referida fonte, o estoque operacional mundial de robôs industriais atingiu mais de 2 milhões de robôs nessa mesma data. A estimativa é de que até 2021 existam mais de 3,5 milhões de robôs instalados mundialmente e que ocorra um aumento de 65% na comercialização de robôs, se comparados aos dados de 2017. Os dados apresentados mostram estimativas tanto dos robôs industriais clássicos quanto dos colaborativos. Segundo (Forbes, 2018), os robôs colaborativos representam atualmente 3% de todas as vendas, porém, esse cenário tende a mudar e chegar em 34% até 2025.

Com o mercado de robôs industriais crescendo dessa forma, mais modelos e mais aplicações tendem a aparecer. Além disso, com novas tecnologias aplicadas a eles, podem surgir cada vez mais variáveis para o processo; "*ao selecionar um robô industrial para uma determinada aplicação industrial, o tomador de decisão precisa considerar todos esses atributos (subjetivos e objetivos; atributos benéficos e de custo)"* (Sen, Datta, Patel, & Mahapatra, 2015), e considerando a tendência, isso pode se tornar um grande problema para o tomador de decisão.

Fora o crescimento acelerado dos robôs industriais, segundo dados do anuário estatístico de acidentes do trabalho (Ministério da Fazenda, Instituto Nacional do

Seguro Social, & Empresa de Tecnologia e Informações da Previdência, 2017), houveram 549.405 casos de acidentes do trabalho, dos quais 2.096 resultaram em mortes, e 12.651 incapacitados permanentes (trabalhadores que tiveram um dano grande e não podem mais voltar a realizar atividades). De 2012 a 2017, foram gastos R$66 bilhões com benefícios acidentários ativos, e, somente considerando as novas concessões no período, o valor é de R$26 bilhões, conforme o (Ministério Público do Trabalho & Organização Internacional do Trabalho, 2018). Os robôs colaborativos podem rapidamente ajudar a reduzir esses valores, visto que em suas características principais estão a segurança (Bloss, 2016) e a melhoria da ergonomia (Maurice, Padois, Measson, & Bidaud, 2017) (Cherubini, Passama, Crosnier, Lasnier, & Fraisse, 2016).

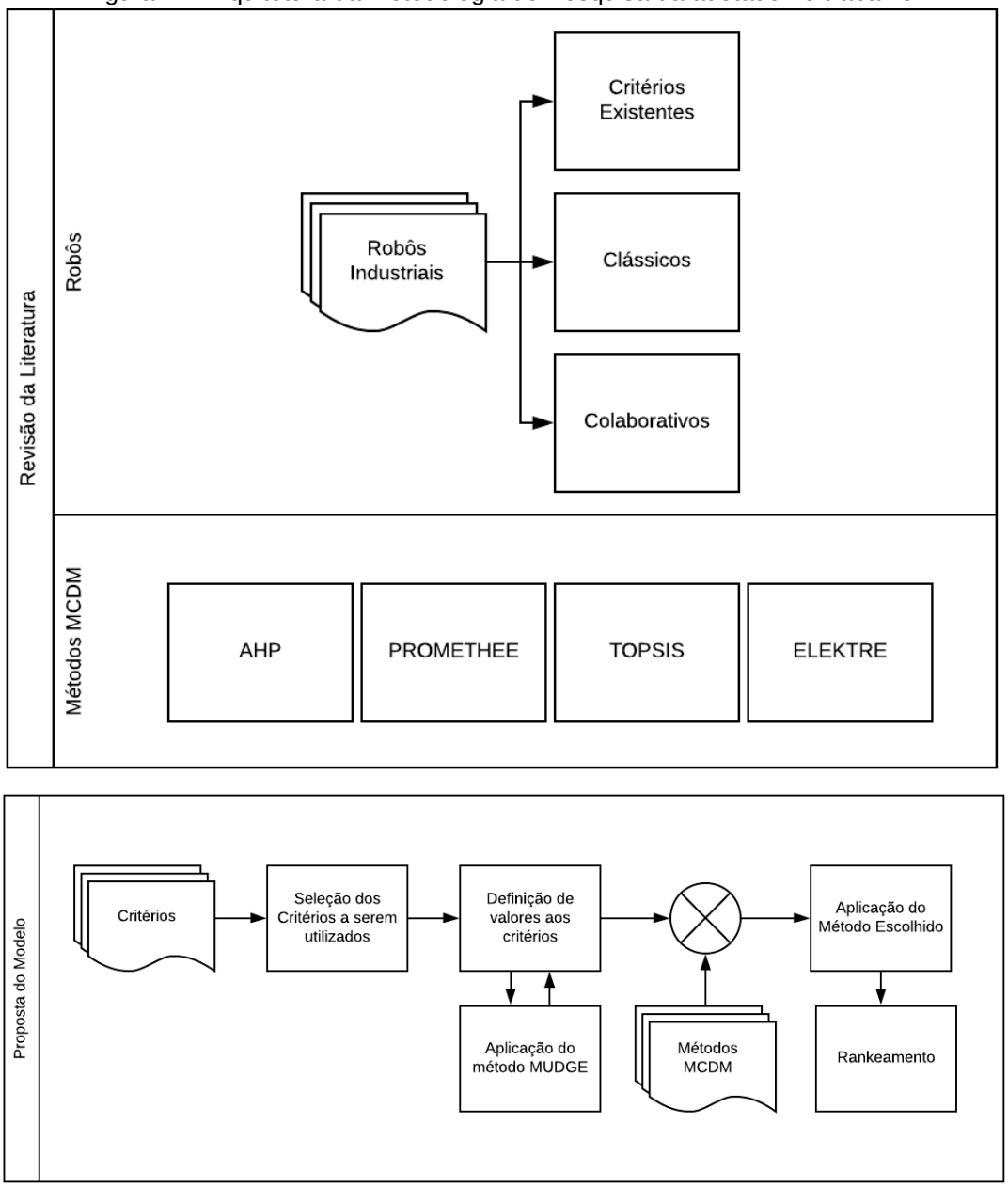
Com base nos dados apontados acima, é pretendido que o trabalho possa auxiliar os tomadores de decisões com o crescente cenário dos robôs industriais, em simultâneo, em que forneça uma visão dos emergentes robôs colaborativos, que terão uma grande participação nas indústrias futuras. Espera-se que as escolhas feitas pelos gestores sejam mais assertivas, com fundamentação teoria e, consequentemente, reduzindo possíveis prejuízos de uma seleção incorreta.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Essa pesquisa é considerada de natureza aplicada, pois possui o objetivo de gerar conhecimento aplicado à solução de problemas práticos, enfrentados pela indústria e setores de automação e robótica. Do ponto de vista da forma de abordagem do problema, este é um problema qualitativo, pois considera que existe uma relação entre o mundo e o sujeito que não pode ser traduzida em números. Possui objetivo exploratório, pois não visa obter valores como resultados, mas compreensão súbita do problema apresentado.

Os procedimentos técnicos adotados nessa pesquisa são bibliográficos, pois utilizam da revisão bibliográfica para obtenção de conhecimentos que tornem possível o desenvolvimento do método, e é de caráter experimental, pois há a necessidade de manipular variáveis que influenciem em seu funcionamento. Na Figura 1 foi explicado o desenvolvimento da dissertação:

Figura 1 – Arquitetura da Metodologia de Pesquisa da adotado no trabalho.



Fonte: (O autor, 2020)

No capítulo 2 inicia a revisão da literatura, onde serão estudados os robôs e os métodos multicritério para tomada de decisão. No primeiro será necessário entender as definições do termo robô, entender os grupos os quais os robôs são divididos e principalmente o que são robôs industriais clássicos, e o que são robôs industriais colaborativos. Durante essa revisão, serão revisados os autores que já trabalharam com a seleção de robôs industriais, identificando-se os critérios utilizados pela literatura.

Com base na revisão dos autores e dos critérios, será possível identificar os Métodos Multicritério de Apoio a tomadas de Decisões (MMAD) utilizados por eles. O que deverá ser estudado com o intuito de entender e demonstrar os pontos fortes e fracos de cada um dos métodos mais utilizados.

Após a revisão da literatura, capítulo 3, será proposto o método para seleção de robôs clássicos e colaborativos, baseando-se no conceito de tomada de decisão multicritério (MCDM). Esse sistema considerará a decisão dos critérios a serem utilizados pelo tomar de decisão, uma forma de atribuir pesos aos critérios de forma ágil e um método MCDM proposto.

A proposição será avaliada em um capítulo 5, utilizando 2 casos experimentais de uma fabricante de veículos. Nesse capítulo serão considerados os critérios mínimos da aplicação, e será aplicado o sistema proposto.

O capítulo 6 trará a conclusão do estudo e do sistema proposto, assim como as limitações desse trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é explorado a literatura com o intuito de entender o que são robôs, as partes mecânicas e os termos existentes nesse assunto, assim como critérios e métodos já utilizados para seleção de robôs.

2.1 FUNDAMENTOS DE ROBÔS

O conceito e a definição do que é um robô vem sendo discutido por vários autores. Segundo (Calo, A, & Kerr, 2016) "*Um robô é um sistema construído que exibe a agência física e mental, mas não está vivo no sentido biológico*". Outra definição, dada por (Technical Committee ISO/TC184, 2012), diz que um robô é "*Mecanismo atuado programável em dois ou mais eixos com um grau de autonomia, movendo-se dentro de seu ambiente, para executar tarefas pretendidas*". Além dessas, o RIA (Robotics Institute of America, 1980) que diz que *"Um robô é um manipulador multifuncional reprogramável projetado para mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especializados por movimentos variáveis programados para o desempenho de uma variedade de tarefas.*".

Segundo (Skillicorn, Billingsley, & Williams, 2018), há uma confusão considerável sobre o que exatamente o termo "robô" deve significar, eles complementam que normalmente os autores tentam misturar dois conceitos subjacentes bastante distintos: um dispositivo que realiza ações físicas, em simultâneo, em que se assemelha a um humano.

É possível ver que não existe uma definição "precisa" sobre o tema, mas uma forma de pensar variável, que vai de autor para autor. Há apenas um consenso: a primeira vez que o termo "robô" apareceu, foi por Karel Čapek (Čapek, 1921), em sua peça "R.U.R", para se referir às pessoas criadas artificialmente, capazes de realizarem trabalhos e pensarem sozinhas. O termo, da forma que foi usado, não representa as definições de robôs presentes atualmente, mas se enquadra em um nicho da robótica que são hoje os robôs humanoides. Ainda assim, é possível ver que em 1921 já se pensavam em mecanismos e máquinas capazes de pensar e agir por conta própria, sem que um humano ordenasse. Esses mecanismos, entram na definição de robôs dada por (Bridgman, 2004), que diz que um verdadeiro robô é qualquer máquina que possa se movimentar e fazer diferentes tarefas sem ajuda humana.

Para este trabalho, serão utilizadas as definições dadas pela Organização Internacional de Normalização (ISO). A ISO, e sua importância, podem ser descritas pelas seguintes citações (ISO, 2018):

> “A ISO é uma organização internacional não governamental independente, com uma adesão de 162 organismos nacionais de normalização. Através de seus membros, reúne especialistas para compartilhar conhecimento e desenvolver Normas Internacionais relevantes, voluntárias, baseadas no consenso e baseadas no mercado, que apoiem a inovação e forneçam soluções para os desafios globais.”

> *“a ISO publicou 22383 normas Internacionais e documentos relacionados, cobrindo quase todos os setores, desde a tecnologia até a segurança alimentar, agricultura e saúde. Padrões Internacionais ISO impactam a todos, em todos os lugares”*

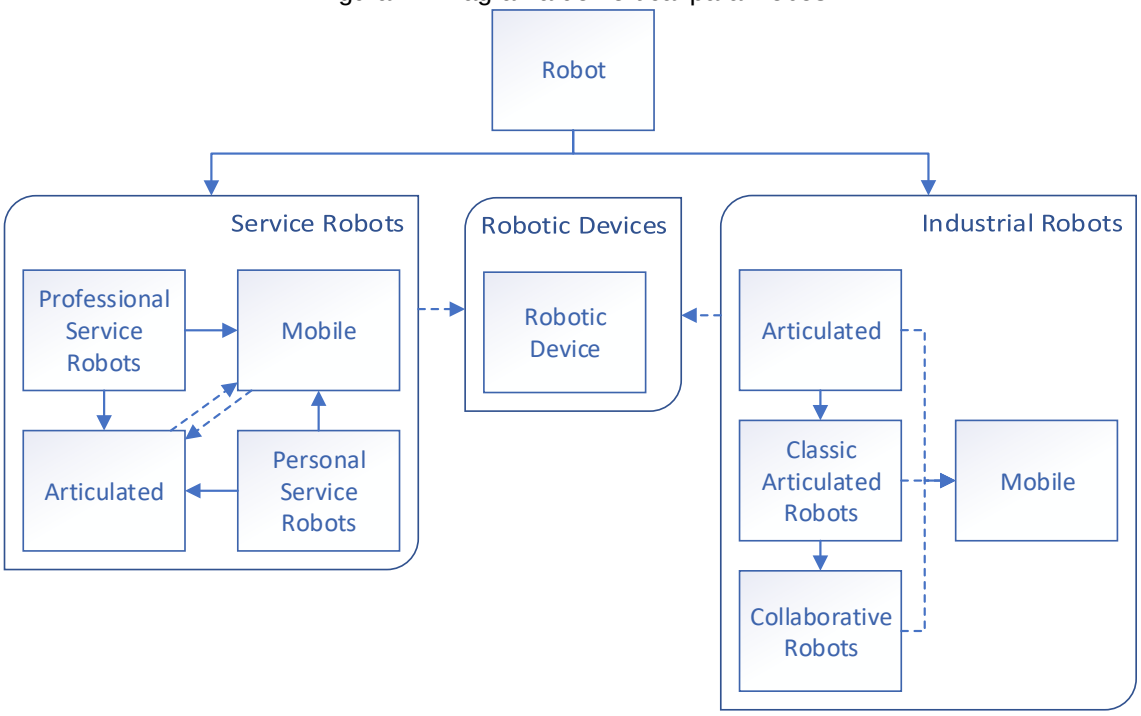
Em específico, será utilizada a ISO 8373 (Technical Committee ISO/TC184, 2012), que define os termos relacionados a robôs e componentes robóticos que operam em ambientes industriais e não industriais, como robôs manipuladores, robôs de serviço, robôs móveis, sistemas robóticos.

2.1.1 Robôs segundo ISO 8373

A ISO 8373 define inúmeros tipos de robôs, dentro de macrocategorias. Cada uma destas possuí subcategorias e cada subcategoria possui inúmeros modelos de robôs, com fabricantes diferentes. Para melhor compreensão de onde os robôs se enquadram e o que significada cada um deles, o diagrama vertical, Figura 2, foi criado.

Não serão tratadas as diferenças técnicas presentes em robôs de uma mesma categoria, visto que, se eles estão na mesma subcategoria, suas utilizações são iguais, e as diferenças entre eles estarão nas especificações técnicas dadas pelo fabricante, que podem variar dependendo da necessidade da aplicação.

Figura 2 - Diagrama de vertical para Robôs



Fonte: (O autor, 2020)

2.1.1.1 Robôs de Serviço

Um robô de serviço, é um "*robô que realiza tarefas úteis para humanos ou equipamentos, exceto aplicações de automação industrial*". Vale ressaltar que, se um modelo determinado de robô for utilizado em aplicações de automação industrial, ele será considerado um robô industrial, mas se o mesmo robô for utilizado em outras tarefas, ele será descrito como um robô de serviço. Um exemplo disso são os robôs articulados, que quando usados em uma linha de produção se enquadram em robôs industriais articulados, mas quando são usados para servir comida são enquadrados como robôs de serviço articulados.

Na categoria de robôs de serviço, os robôs podem ser divididos em:

I. Robôs de serviços pessoais: robôs usados para fins não comerciais. Utilizados, geralmente por leigos, como empregados domésticos, cadeiras de rodas automatizadas, entre outros. O Quadro 1 mostra alguns exemplos de robôs pessoais de serviço.

Quadro 1 - Robôs Pessoais/Domésticos

Tipos de Robôs	
I	Robôs Pessoais/Domésticos
1-7	Robôs para tarefas domésticas
1	- Robô de companhia / Assistente / Humanoids
2	- Robô Aspirador, limpador de chão
3	- Cortador de Grama
4	- Robô Limpador de Piscinas
5	- Robô Limpador de Janelas
6	- Robô de Segurança e vigilancia
7	- Outros
8-11	Robôs de Divertimento
8	Robôs de Hobby ou Brinquedos
9	Robôs Multimídia
10	Robôs de Educação e Pesquisa
11	Outros
12-14	Assistência a idosos e deficientes
12	- Cadeira de Rodas robotizada
13	- Robôs de ajuda pessoal e dispositivos auxiliadores
14	- Outras funções de assistencia
15	Outros Robôs Pessoais / Domésticos

Fonte: (The International Federation of Robotics, 2017)

II. Robôs de serviço profissional: robôs que são usados para tarefas comerciais, geralmente operados por um operador devidamente treinado, como robôs de faxina pública, robôs lustradores, robôs de cirurgia hospitalar. O Quadro 2 irá demonstrar exemplos desses tipos de robôs.

Quadro 2 - Robôs de Serviço Profissional

Tipos de Robôs	
II	Robôs de Serviço Profissional
16-21	Robôs de Campo
16	Agricultura: Robôs de Acre, Robôs para vinho
17	Robôs ordenhadores
18	Outros Robôs de Fazenda
19	Robôs de Mineração
20	Robôs Espaciais
21	Outros
22-26	Robôs de Limpeza Profissional
22	Robôs limpadores de chão
23	Limpadores de janela e limpadores de parede (Incluindo escaladores)
24	Limpadores de tanque, encanamentos e tubos
25	Limpadores de Casco (navios, veículos, aeronaves, etc.)
26	Outras tarefas de limpeza
27-29	Robôs de inspeção e manutenção de Sistemas
27	Instalações e Plantas
28	Tanques, tubos, canos e esgotos
29	Outros sistemas de inspeção e manutenção
30-33	Construção e demolição
30	Demolição e desmantelamento nuclear
31	Construção de Edifícios
32	Robôs para construção civil
33	Outros sistemas de construção e demolição
34-38	Sistemas de Logística
34	Veículos guiados autônomos (AGV) em ambientes de fabricação
35	AGV's em ambientes não industriais (indoor)
36	Movimentação de carga, logística ao ar livre
37	Transporte pessoal (AGV para pessoas)
38	Outras Logísticas
39-42	Robótica Médica
39	Sistemas de Diagnóstico
40	Cirurgia ou terapia assistida por robô
41	Sistemas de Reabilitação
42	Outros robôs médicos
43-45	Aplicações de Resgate e Segurança
43	Robôs de Combate a incêndios e desastres
44	Robôs de vigilância / Segurança sem UAV
45	Outros robôs de resgate e segurança
46-50	Aplicações de defesa
46	Robô de desminagem
47	Veículos aéreos não tripulados
48	Veículos terrestres não tripulados (veículos de combate a bombas)
49	Veículos submarinos não tripulados
50	Outras aplicações de defesa
51	Sistemas subaquáticos (uso civil / Geral)
52	Exoesqueletos Humanos com Alimentação
53	Veículos áreos não tripulados de uso geral
54	Plataformas móveis de uso geral
55-59	Robôs de Relações públicas
55	Robôs de hotéis e restaurantes
56	Orientação móvel, informação, robôs de telepresença
57	Robôs de Marketing
58	Robôs de passeios
59	Outros robôs de relações públicas
60	Outros robôs de serviço profissional não especificados acima

Fonte: (The International Federation of Robotics, 2017)

2.1.1.2 Dispositivos Robóticos

A última categoria é dos dispositivos robóticos, que de acordo com a ISO, são robôs que atendem aos requisitos de robôs industriais e robôs de serviço, mas não tem o número de eixos programáveis ou um determinado grau de autonomia, e então não são enquadrados em nenhuma das duas categorias.

Como exemplos nesta categoria estão os dispositivos de assistência elétrica, como exoesqueletos, dispositivo tele operado e manipuladores industriais de dois eixos.

2.1.1.3 Robôs Industriais

Um robô industrial é um manipulador multifuncional controlado automaticamente, reprogramável, programável em três ou mais eixos, que pode ser fixo ou móvel para uso em aplicações de automação industrial. Essas aplicações incluem, manufatura, inspeção, embalagem e montagem. Um robô industrial inclui um manipulador e atuadores, além de controladores, incluindo uma interface de comunicação. Na categoria dos robôs industriais, um robô pode ser articulado, móvel ou a união de ambos.

1) Robôs Industriais Móveis:

Os robôs industriais móveis são robôs capazes de viajarem sob seu próprio controle. Essa categoria de robôs inclui plataformas móveis com ou sem manipuladores. Exemplos de robôs industriais móveis são os Veículos Automaticamente Guiados (*Automated Guided Vehicles* - AGV), veículos guiados por trilhos (*Rail Guided Vehicles* - RGV), e outros de uma mesma família.

Esses robôs são comumente utilizados nas indústrias para o deslocamento da matéria-prima às linhas de produção, seguindo caminhos pré-programados, ou recentemente, gerando internamente rotas que sejam mais ágeis. AGVs podem ser necessários para carregar uma variedade de configurações de reboques e operar em diferentes layouts de armazém que mudam para acomodar a proliferação de SKU[1] e

---

[1] O termo *Stock Keeping Unit* (**SKU**) está ligado à logística de armazém e designa os diferentes itens do estoque, estando normalmente associado a um código identificador

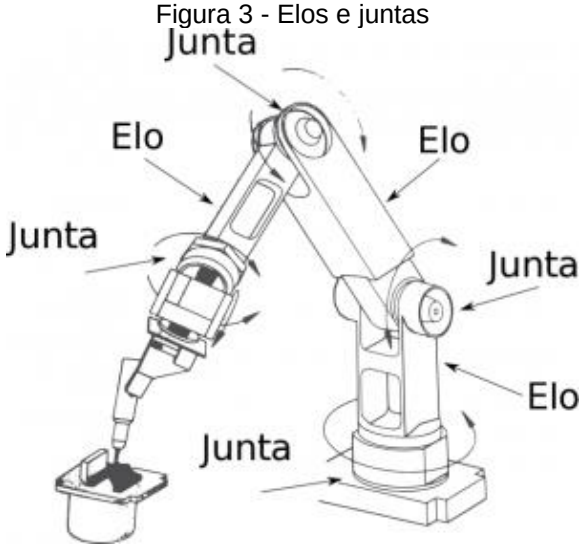
produtos sazonais. Sistemas de orientação por laser, visão, fita magnética, inercial e fio permitem que os operadores redirecionem os caminhos AGV nesses armazéns em mudança (Beverage Industry, 2012). Além disso, segundo (Hewson, 2013) tais veículos podem fornecer benefícios-chave, tais como permitir transporte, armazenagem, entrega e distribuição de componentes vitais mais eficientes e ambientalmente amigáveis.

2) Robô Industrial Articulado:

Antes de serem explicados os modelos e classificações nesta categoria, é importante a revisão da literatura utilizada por ela.

Robôs industriais articulados consistem em elos, que são conectados por juntas, que permitem a geração de movimento entre ambos os elos. Cada junta normalmente possui sensores de posição que possam informar o usuário a posição em que os elos se encontram. A Figura 3 demonstra a relação elo/junta.

Figura 3 - Elos e juntas



Fonte: (Pazos, 2002)

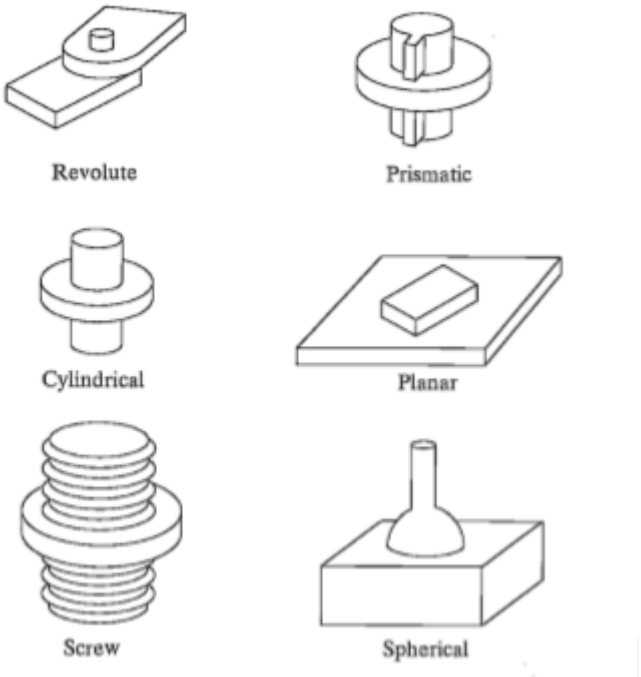
Com a estrutura do robô feita, existe o conceito de graus de liberdade. O número de graus de liberdade que um manipular possui é o número de variáveis de posição independentes que precisariam ser especificadas para localizar todas as partes do mecanismo (Craig, 1986). Normalmente nos robôs articulados, cada junta representa um grau de liberdade, isso, pois comumente cada junta representa uma posição independente definida com uma única variável.

No final da cadeia de elos, na extremidade livre, que compõem o manipulador está o efetor final (Craig, 1986). O efetuador final pode variar de aplicação para

aplicação, dependendo da necessidade incorporada. Ele pode ser uma tocha de solda, um ímã, um pegador, dentre outros. Os links de um robô são numerados a partir da base imóvel do braço, que pode ser chamada de link 0. O primeiro corpo em movimento é o elo 1, e assim por diante, até a extremidade livre do braço, que é o elo n.

O termo "par inferior" é usado para descrever a conexão entre um par de corpos. O movimento relativo é caracterizado pelas superfícies deslizando umas sobre as outras (Craig, 1986). A Figura 4 abaixo apresenta os 6 tipos de movimentos existentes.

Figura 4 - Tipos de Juntas



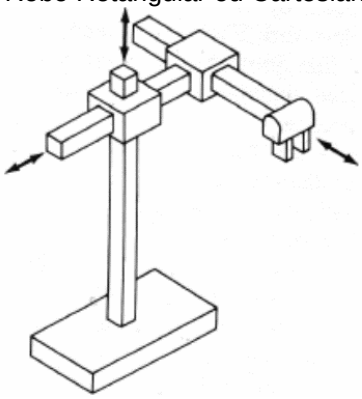
Fonte: (Craig, 1986)

Após a revisão da terminologia, pode-se dizer que um robô industrial articulado, é um manipulador programável, reprogramável, polivalente, automático e programável em três ou mais eixos, que pode ser fixo ou móvel para uso em aplicações de automação industrial (ISO-8373, 2012).

Dentro da categoria de robôs articulados existem definições de acordo com a estrutura, e existem os seguintes tipos, com suas respectivas características e representações:

I. Robô Retangular ou Robô cartesiano: Um robô cujo braço possui três juntas prismáticas, e cujos eixos são coincidentes com um sistema de coordenadas cartesiano. Exemplo Figura 5;

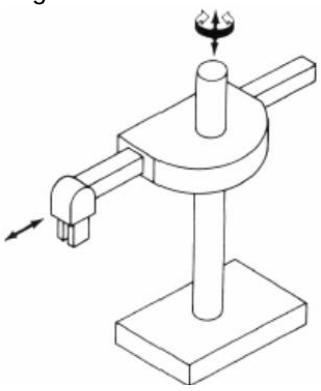
Figura 5 - Robô Retangular ou Cartesiano



Fonte: (Amaral, 2009)

II. Robô Cilíndrico: Um robô cujo braço possui ao menos uma junta rotatória, e ao menos uma junta prismática e cujos eixos formam um sistema de coordenadas cilíndricas. Exemplo Figura 6;

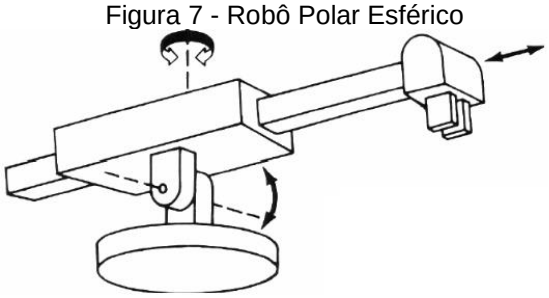
Figura 6 - Robô Cilíndrico



Fonte: (Amaral, 2009)

III. Robô Polar esférico: Um robô cujo braço possui duas juntas rotatórias e uma prismática, e cujos eixos formam um sistema de coordenadas polares. Exemplo Figura 7;

Figura 7 - Robô Polar Esférico

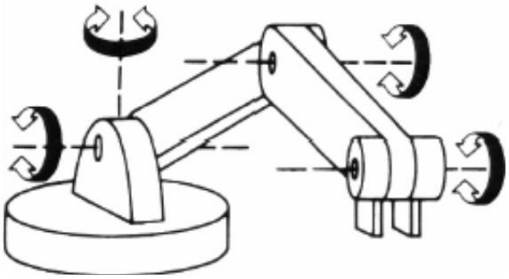


Fonte: (Amaral, 2009)

a. Robô pendular: Um Robô polar cuja estrutura mecânica inclui um subconjunto de articulação universal.

IV. Robô Articulado Clássico: robô cujo braço tem três ou mais juntas rotativas. Exemplo Figura 8;

Figura 8 - Robô Articulado

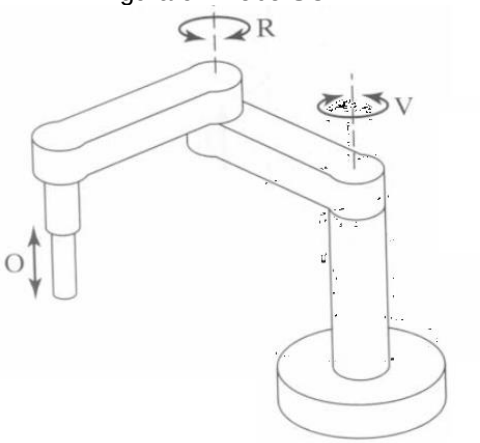


Fonte: (Amaral, 2009)

Dentro dessa categoria ainda existem os robôs articulados colaborativos, que serão explicados no próximo capítulo, assim como as diferenças entre os dois modelos.

V. Robô SCARA: robô que possui duas juntas rotativas paralelas para fornecer conformidade em um plano selecionado. Exemplo Figura 9;

Figura 9 - Robô SCARA



Fonte: (Amaral, 2009)

VI. Robô *Spine*: robô cujo braço é composto de duas ou mais juntas esféricas;

VII. Robô Paralelo ou Robô de *link* paralelo: robô cujos braços têm elos que formam estruturas de circuito fechado. Exemplo Figura 10;

Figura 10 - Robô Paralelo

Fonte: (ADEPT, 2010)

VIII. Robô Industrial Articulado Móvel: essa categoria une os Robôs Industriais Móveis, com qualquer tipo de robô Industrial articulado, normalmente utilizando robôs articulados em cima de qualquer base móvel para realizar tarefas pré-programadas em diversos lugares.

2.1.2 Robôs Articulados Colaborativos vs Robôs Articulados Clássicos

Na categoria de robôs industriais articulados, existem os robôs colaborativos. Esses robôs compartilham das mesmas definições de estrutura que os robôs articulados clássicos.

A idealização dos *Collaborative Robots* (*COBOT*s) foi feita por James E. Colgate e Michael A. Peshkin e foi patenteada em 1999 (United States of America Patente Nº 5,952,796). A ideia deles foi de um aparato e método para interação física direta entre uma pessoa e um manipulador de uso geral controlado por um computador.

Colgate e Peshkin perceberam existir uma limitação muito grande nas máquinas especializadas e nos robôs clássicos. No primeiro caso, as máquinas especializadas tinham um grande problema de reprogramabilidade, o que fazia com que, não somente elas não pudessem ser reprogramadas para fazer uma tarefa diferente, como até mesmo modificações em tarefas particulares, nas quais elas foram desenhadas para desempenhar, poderiam requerer uma mudança de *hardware*.

No segundo caso, dos robôs articulados convencionais, o problema não era a flexibilidade, visto que eles são projetados para serem adaptáveis a diversas tarefas, simplesmente pela reprogramação, mas sim que essa categoria de robô não colaboram bem com humanos e também carecem de certas capacidades que trabalhadores humanos possuem.

O primeiro problema ocorre, pois, os robôs clássicos, normalmente, operam em alta velocidade e, somadas às suas características físicas, podem ter consequências devastadoras sobre alguém ou qualquer coisa em sua área de atuação. Um mau funcionamento pode fazer com que o robô saia do controle e atinja uma pessoa próxima com força suficiente para causar ferimentos ou até mesmo morte. Como resultado disso, as pessoas normalmente são excluídas de sua área de atuação durante seu funcionamento.

O segundo problema é que, sem que outros dispositivos sejam integrados, a capacidade de um robô clássico de se adaptar e ter a destreza humana para a montagem ou junção de peças de trabalho que não se encaixam perfeitamente, ou não estão perfeitamente posicionadas, é ínfima para inexistente. Ainda nesse problema, a capacidade humana de detectar e lidar com situações adversas, como partes defeituosas, é altamente valiosa.

Com esses problemas citados acima, os autores propuseram e patentearam, o que hoje são princípios e características existentes nos robôs articulados colaborativos, esses princípios serão descritos abaixo.

I. Um *COBOT* deve possibilitar uma colaboração física direta entre um robô e um manipulador controlado por computador;
II. Os *COBOT*s possuem várias configurações comuns aos robôs clássicos;
III. Os *COBOT*s permitem a criação de superfícies virtuais, campos de potencial virtual e outros esquemas de orientação via software que são levados ao mundo físico. Essas superfícies ou limites virtuais podem ser configuradas, por exemplo, para proteger contra colisões;
IV. Os operadores e os *COBOT*s podem trabalhar em um mesmo objeto e o *COBOT* pode ser projetado para que responda apenas às forças exercidas pelo operador humano após a filtragem ou modificação pelo Software do *COBOT*. Por exemplo, o *COBOT* pode cumprir totalmente os movimentos pretendidos pelos operadores humanos em algumas regiões da área de trabalho, mas jamais passar por algumas “superfícies virtuais” ou limites definidos no software;

V. *COBOT*s podem ser passivos ou ativos:
    a) Na forma passiva, o *COBOT* não fornece energia motriz, mas sim a força motriz é fornecida pelo operador humano. O *COBOT* usa meramente motores em resposta às forças aplicadas pelo operador humano;
    b) Na forma ativa eles podem funcionar com funções de assistência e/ou frenagem de potência para auxiliar, ou resistir a forças aplicadas pelo operador humano.

Em 2005 surgiu o primeiro robô colaborativo do mundo, fabricado pela *Universal Robots* (**UR**), capaz de operar de forma segura ao lado de pessoas (Universal Robots, 2018). Além desse robô, atualmente é possível citar outros robôs que desempenham também o papel de robôs colaborativos, como o LBR Iiwa da KUKA, FANUC 35iA da FANUC e inúmeros outros.

Os robôs colaborativos possuem sensores de torque e corrente, para garantir a sensibilidade do robô ao toque, garantindo a segurança dos operadores e dos

trabalhos de colaboração. Em sua interface de programação, eles possuem uma interface de cargas e sensores, onde é necessária a configuração de cargas externas. Essas cargas podem ser um choque com um operador, um choque com outros robôs, dentre outras, e isso durante várias etapas do seu processo. Sendo assim, o robotista responsável pela programação deve tomar cuidado na hora de definir essas cargas, para que a segurança dos colaboradores seja mantida.

Além disso, são robôs altamente flexíveis, com programação fácil e implantação rápida (ROBOTIQ, 2018), que se dá ao fato de não ser necessário um especialista em robótica para programa-lo, nem de equipes de segurança, já que a segurança desses robôs é previamente aceita pela TÜV *Rheinland* e enquadradas nas normas ISO (*Universal Robots* TÜV *Certificate* (TÜV NORD, 2015), KUKA *LBR Certificate* (TÜV SAAR, 2016), FANUC TÜV *Certificate* (TÜV SÜD, 2016)).

A partir das características dos dois tipos de robôs industriais, articulado clássico e articulado colaborativo, o Quadro 3 foi montada. A ideia deste quadro é sintetizar qual robô é melhor no que, utilizando características encontradas nos sites dos fabricantes, onde os próprios definem os pontos fortes de seus robôs.

Quadro 3 - Comparativo Robô Clássico x Colaborativo

	Robôs Articulados Convencionais	Robôs Articulados Colaborativos
Flexibilidade		X
Segurança		X
Tempo de Instalação		X
Programação		X
Custo de Compra	X	
Custo do Projeto de Automação		X
Velocidade Máxima	X	
Payload	X	

Fonte: (O Autor, 2020)

No critério flexibilidade, os robôs colaborativos são melhores (ROBOTIQ, 2018). Os robôs clássicos normalmente são instalados em lugares fixos, pois necessitam de grades de proteção, cadeados de segurança, dentre vários outros recursos de segurança para que seja liberado seu funcionamento. Além disso, caso seja necessária a mudança de um código de programação, é necessário que os

especialistas de robótica avaliem a situação, criem o novo código e façam uma série de testes para garantir a integridade da segurança, o que torna esse robô menos flexível comparado ao colaborativo, que por ter segurança nativa, e ter uma programação amigável (Universal Robots, 2018), facilita sua reprogramação e realocação em uma nova tarefa.

O Quadro 4 irá mostrar as leis e normas regulamentadoras para a utilização de ambos os tipos de robôs, os modos de funcionamento que esses podem ter, equipamentos necessários para o funcionamento automático e riscos à saúde com base nas normas ISO-15066 (ISO, 2016), ISO-10218 (ISO, 2011), ISO-12100/NR-12 (Governo do Brasil, 2019).

Quadro 4 - Robôs Colaborativos vs clássicos

Categoria	***Robô Colaborativo***	***Robô Clássico***
Segurança:	ISO-15066, ISO-10218	NR-12, ISO-12100, ISO-10218
Equipamentos de segurança:	**Depende do modo de funcionamento**: • Sensor de proximidade; • Sensor ótico.	**Obrigatório**: algum tipo de barreira: • Barreira de Luz; • Tapete de Peso; • Grades de proteção. **Adicional**: • Portas em caso de entrada no espaço do robô com cadeado de segurança; • Sensores de proximidade; • Sensores óticos.
Modo de funcionamento	• Parada monitorada de segurança; • Ensino manual; • Monitoramento de velocidade e separação; • Limitação de potência e força.	Contínuo.
Riscos à saúde	Verificar Figura 12 e Quadro 5	Verificar Figura 11 e Quadro 5

Fonte: (O Autor, 2020)

O Quadro 5 serve para explicar as etapas de decisão na análise de riscos realizada pela ABB, e deve ser utilizada em conjuntos com as imagens.

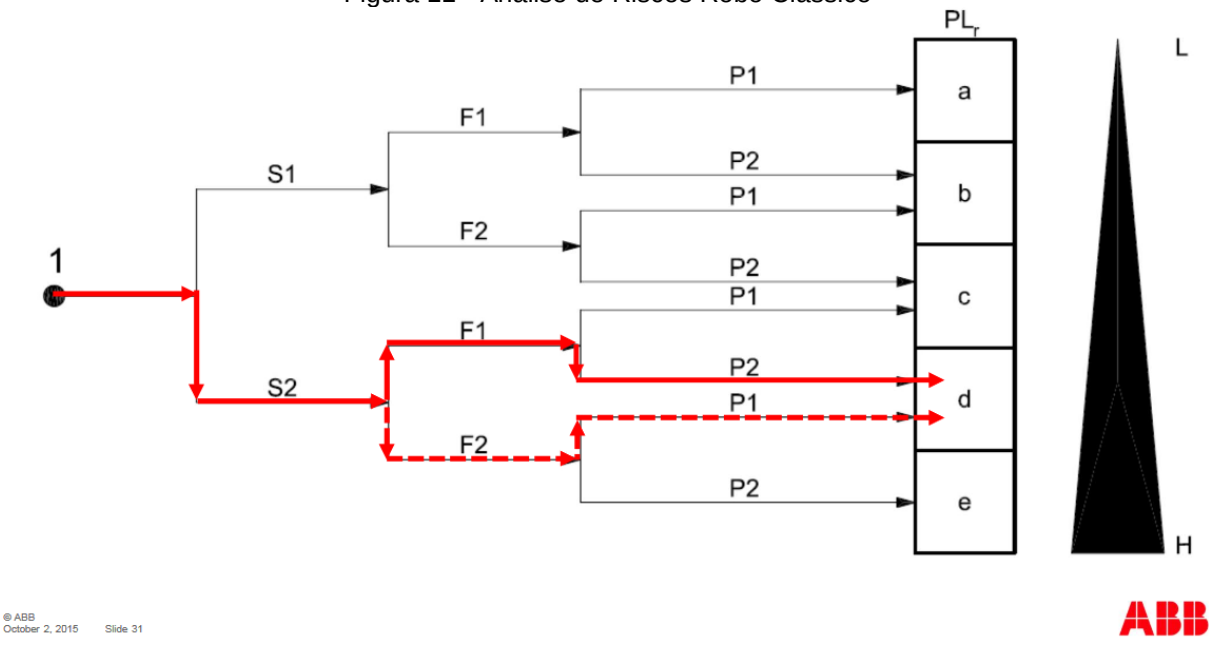
Quadro 5 - Tabela de Análise de riscos

Dano ao operador Reversível (S1) ou não (S2)	Exposição contínua (F2) ou não (F1)	Probabilidade de ocorrer o acidente, baixa (P1) ou alta (P2)	Risco
S1	F1	P1	A
		P2	B
	F2	P1	
		P2	C
S2	F1	P1	
		P2	D
	F2	P1	
		P2	E

Fonte: (O Autor, 2020)

A Figura 11 demonstra a análise de riscos, feita pela fabricante ABB, para os robôs clássicos. Vale ressaltar que a imagem demonstra o risco potencial do robô, onde “A” é o menor risco e “E” o maior risco.

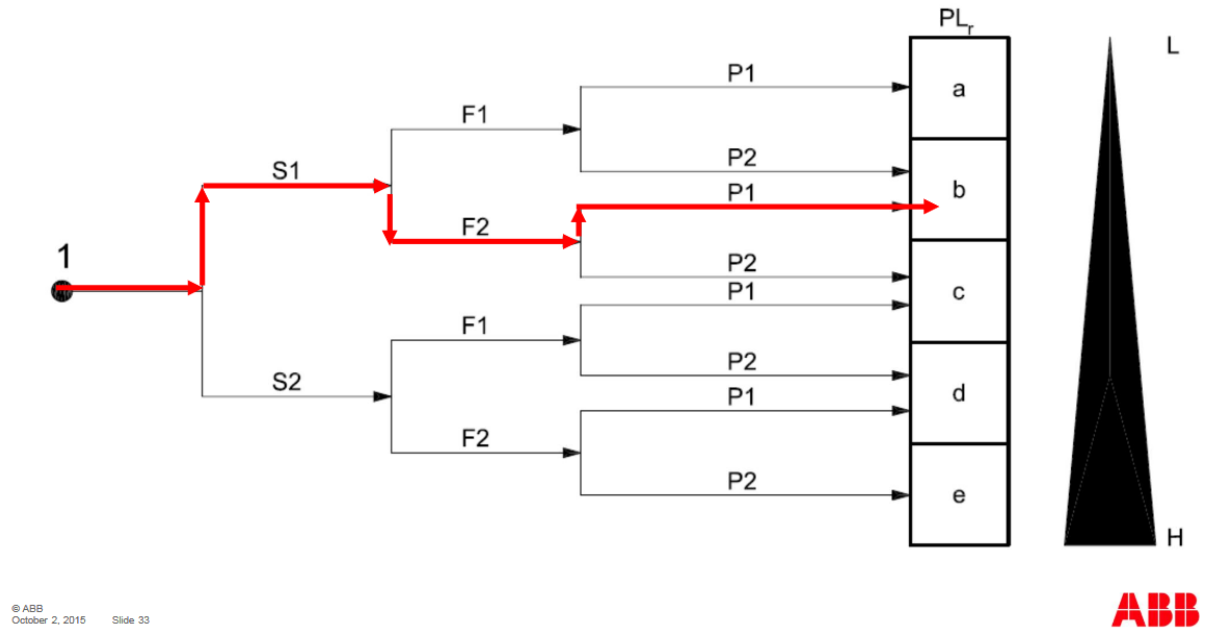
Figura 11 - Análise de Riscos Robô Clássico



Fonte: adaptado de (Matthias, 2014)

A Figura 12 também demonstra a análise de riscos feita pela ABB, mas dessa vez para robôs colaborativos.

Figura 12 - Análise de Riscos Robô Colaborativo



Fonte: adaptado de (Matthias, 2014)

Em um robô convencional, a lesão pode ser permanente, isso ocorre, pois, o robô convencional não possui nenhum sensor nativo que force sua parada, além disso, esses robôs costumam trabalhar em uma velocidade muito maior que os robôs colaborativos.

Já na exposição, os robôs colaborativos ficam a frente dos convencionais, isso ocorre pois, na maior parte dos casos, o robô colaborativo atua em espaço compartilhado com o operador enquanto os convencionais têm uma área de trabalho própria e não permitem a aproximação de operadores.

A probabilidade de ocorrer um acidente envolvendo um robô colaborativo também é mais baixa, já que o robô possuí sensores de contato nativo, que vão realizar a parada em caso de colisões, possuem velocidade de operação reduzida, não possuem pontos de pinça, dentre outros.

Os critérios descritos acima também colaboram para uma implantação mais rápida por parte dos robôs colaborativos, visto que esse tipo de robô já tem as normas de segurança intrínsecas, não sendo necessário um estudo para garantir a segurança dos operadores. Além disso, não será necessária uma mobilização para a construção de grades de segurança, isolamento da área de atuação do robô e dispositivos extras.

A facilidade de implantação dos robôs colaborativos também contribui com o custo de instalação, ainda que o custo de compra de um robô colaborativo seja maior que um robô clássico, (Exemplo: robô UR5 colaborativo, tem um custo de compra de 35 mil dólares e o robô FANUC LR Mate 200iA, com características próximas ao UR5, mas não colaborativo, custa 25 mil dólares (ROBOTIQ, 2018)), isso, pois um robô colaborativo necessita de menos tempo para a instalação, menor mobilização da equipe de segurança, menos especialistas em robótica, integradores, e tempo de projeto de rotas.

De forma geral, os robôs clássicos têm uma escala de *Payload* maior. O robô colaborativo com o maior *Payload* do mercado (COMAU, 2018) suporta 170 quilos, e não é difícil encontrar robôs clássicos que suportem cargas muito superiores a essa, como, por exemplo, os robôs da série ***M****-900* da FANUC, que suportam até 700 quilos (FANUC, 2018).

Outra característica na qual os robôs clássicos se saem melhor é a velocidade de funcionamento. Robôs colaborativos, são projetados para atividades colaborativas, que no que lhe concerne tem normas de velocidade de funcionamento conforme ISO 15066 (ISO, 2016). Outro fator que colabora com isso é o fato de os robôs clássicos trabalharem em confinamento, com inúmeros sistemas de proteção que impeçam colaboradores de entrar na sua área de atuação, o que possibilita que eles possam trabalhar em velocidades elevadas atendendo às normas ISO.

2.1.3 Modos de colaboração

Os robôs colaborativos não precisam necessariamente trabalhar em conjunto com humanos. Na verdade, segundo a ISO 10218 (ISO, 2011) e a ISO/TS 15066 (ISO, 2016), existem pelo menos 4 modos de colaboração, descritos abaixo:

2.1.3.1 Parada Monitorada de segurança

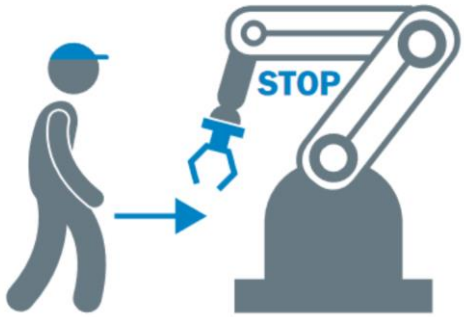
Esse modo de programação colaborativa ocorre quando um robô está trabalhando por conta própria, mas pode ocorrer de um operador precisar entrar no seu espaço de trabalho para realizar alguma atividade. Nesse modo, se o humano entrar na área de funcionamento do robô (pré-determinada), o robô irá ativar todos os freios e irá parar sua atividade até que o operador saia de sua área.

Exemplo: o robô está realizando uma atividade em uma determinada peça e um operador precisa checar manualmente algo nessa mesma peça. Assim que o operador entrar na área de funcionamento do robô, o robô para de funcionar até que o operador cheque, saia da área, e sinalize que o robô pode voltar a trabalhar.

Esse modo de programação normalmente serve quando a ação do robô pode gerar algum risco ao operador se estiver em movimento.

A Figura 13 demonstra um exemplo da atividade colaborativa descrita acima.

Figura 13 - Modo de Colaboração: Parada Monitorada de Segurança



Fonte: (SICK, 2017)

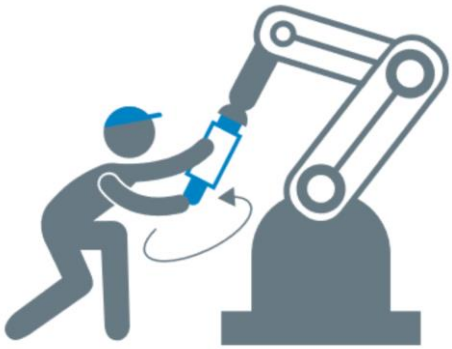
2.1.3.2 Ensino Manual

Essa aplicação é utilizada para guiar o robô ou ensinar o robô a fazer alguma atividade de forma guiada. Esse tipo de aplicação é muito utilizado quando é necessário que seja realizada uma nova rota de funcionamento sem que haja muito tempo para programá-la. Nesse modo, a atividade colaborativa só ocorre quando a função de guiar está ocorrendo, após isso, o robô deve entrar em outro modo de colaboração.

Exemplo: Surgiu uma demanda que tem uma nova peça que deve ser pega de um lugar x e colocado em um lugar y. O operador pode entrar na zona colaborativa, o robô para e espera um de seus sensores de força ou algum comando que inicie o ensino manual. Após esse novo caminho ser programado, o operador sai da zona de funcionamento do robô e o robô volta a funcionar normalmente.

A Figura 14 demonstra um exemplo da atividade colaborativa descrita acima.

Figura 14 - Modo de Colaboração: ensino Manual



Fonte: (SICK, 2017)

2.1.3.3 Monitoramento de Velocidade e Separação

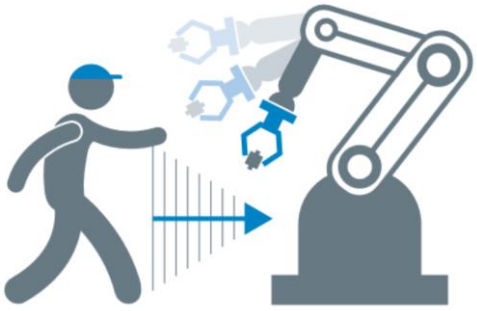
No monitoramento da velocidade, o robô industrial é monitorado por lasers ou qualquer sistema que verifique a distância entre os operadores e o robô. Isso ocorre, pois, nesse modo de funcionamento, o robô responde à distância que o operador se encontra do robô, com uma redução na sua velocidade de funcionamento. Se o operador está dentro de uma das zonas de segurança (pré-programadas), o robô irá responder com a velocidade designada para aquela região, até parar quando o trabalhador se aproximar demais.

Diferentemente da parada monitorada de segurança, não é necessário que o operador libere o robô para funcionamento após sua saída da área de atuação dele. Nesse modo, as zonas de segurança já fazem esse papel.

Exemplo: Um robô está continuamente pegando materiais e colocando em caixas. Se um operador começar a se aproximar, o robô continua o trabalho, de forma mais lenta, e continua reduzindo conforme o operador vai se aproximando. Até que quando o operador saia de todas zonas de segurança, o robô volte a funcionar na velocidade máxima.

A Figura 15 demonstra um exemplo da atividade colaborativa descrita acima.

Figura 15 - Modo de Colaboração: Monitoramento de Velocidade e Separação



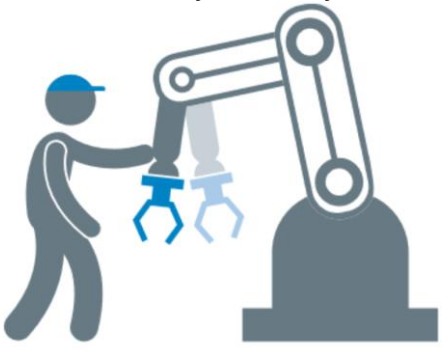
Fonte: (SICK, 2017)

2.1.3.4 Limitação de Potência e Força

Esse modo é o mais conhecido e, comumente, é o que as pessoas acreditam ser o único modelo de colaboração. Nesse modelo de atividade colaborativa, o robô trabalha sem qualquer dispositivo de segurança, como lasers, sensores, sistemas de visão. O robô utiliza seu sistema nativo de segurança (sensores de torque sensíveis) para saber se deve parar ou não. Basicamente o robô fica realizando a atividade em conjunto com um operador, e caso ocorra qualquer colisão entre os dois, ou até mesmo do robô com algum outro componente, ele para e espera alguma ação, também pré-programada, por parte do operador.

A Figura 16 demonstra um exemplo da atividade colaborativa descrita acima.

Figura 16 - Modo de Colaboração: Limitação de Potência e Força



Fonte: (SICK, 2017)

2.2 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS ROBÔS

Todos os modelos de robôs acima citados são amplamente utilizados e cada uma das categorias possui variáveis e pesos diferentes para a sua seleção, além de

aplicações diferentes. Segundo (Iç, Yurdakul, & Dengiz, 2013) a determinação do robô mais apropriado tem sido uma decisão difícil para os compradores de robôs, especialmente novos comprovadores, devido à grande variedade de modelos disponíveis para qualquer aplicação, e a necessidade de consideração de múltiplos critérios qualitativos e quantitativos alinhados à falta de padrões de desempenho do robô.

É possível comprovar que inúmeros autores, como (Goh, 1997) (Kapoor & Tak, 2005) (Chatterjee, Athawale, & Chakraborty, 2010), realizaram o comparativo apenas considerando os robôs de uma mesma categoria, no caso, os robôs industriais articulados convencionais. Utilizar categorias diferentes, que muitas vezes não tem uma aplicabilidade similar, podem o processo de seleção mais complexo. Por esses motivos, o presente documento somente irá tratar dos robôs articulados clássicos e colaborativos, e os critérios de seleção usados na literatura para eles.

As mais de três décadas, inúmeros autores, engenheiros, cientistas e especialistas em robótica vem estudado a seleção de robôs. São utilizados inúmeros critérios objetivos e subjetivos nas escolhas de cada autor e, além disso, muitos métodos baseados em precisão para seleção de robôs foram desenvolvidos (Kumar & Garg, 2010).

Abaixo serão mostrados alguns dos autores pesquisados e os critérios:

- (Khouja & Booth, 1995) utilizaram em seu modelo, os critérios de repetibilidade, velocidade e *Payload*;
- (Tung, Cheng, & Goh, 1996) utilizaram os valores atribuídos por especialistas tanto para fatores objetivos, velocidade, *Payload*, custo e repetibilidade, como para subjetivos: qualidade de serviço do fornecedor e flexibilidade de programação do robô. Para não gerar valores que prejudicassem o consenso, eles retiraram os valores máximos e mínimos das análises dos especialistas;
- (Goh, 1997) utilizou como base dois critérios objetivos: performance, que era calculado com base em: velocidade do robô, *Payload* e repetibilidade, e custo, que era calculado com base em custo de compra, custo de instalação e custo de treino. Além de um critério subjetivo, que era a qualidade de serviço do fornecedor;

- (Parkan & Wu, 1999) utilizaram o mesmo grupo de 27 robôs que Khouja & Booth, e aplicaram quatro critérios objetivos: repetibilidade, custo, *Payload* e velocidade;
- (Chu & Lin, 2003) utilizaram critérios não-funcionais, como interface homem-máquina, flexibilidade de programação e contrato de serviço do fornecedor, e critérios objetivos, custo de compra, *Payload* e precisão de posicionamento;
- (Bhangale, Agrawal, & Saha, 2004) propuseram uma base de dados com todas as características técnicas dos robôs, e no exemplo de seu artigo, utilizaram *Payload*, repetibilidade, velocidade máxima da ponta, capacidade de memória e alcance do manipulador como critérios na seleção;
- (Kapoor & Tak, 2005) utilizaram os critérios de custo, velocidade, repetibilidade e *Payload*, e então, os utilizaram em um exemplo do mundo real;
- (Bhattacharya, Sarkar, & Mukherjee, 2005) definem os critérios com base nos requirimentos do consumidor e em requerimentos técnicos definidos por eles. No artigo, o consumidor requeria: carga útil, precisão, expectativa de vida, velocidade, flexibilidade de programação e total custo do robô, e em requirimentos técnicos identificados por eles: sistema de acionamento, destreza geométrica, sistema de medição de trajetória, tamanho, material, peso e custo operacional inicial do robô;
- (Rao & Padmanabhan, 2006) Verificaram inúmeros atributos que podem ser considerados para a decisão (Custo, configuração, *Payload*, tipo de controle, velocidade, tipo de programação, flexibilidade de programação, confiabilidade, repetibilidade, precisão de posicionamento, graus de liberdade, volume de trabalho, sistema de direção, interface homem-máquina, contrato de serviço com o vendedor, treinamento, tempo de entrega, disponibilidade), mas verificaram que não era necessário o uso de todos, pois muitos deles tinham uma corelação. No modelo final, foram aplicados os critérios de repetibilidade, *Payload*, alcance vertical e graus de liberdade;

- (Kahraman, Çevik, Ates, & Gülbay, 2007) dividiram os critérios nas categorias de: atributos de Investimento: custo de compra, custo de instalação, e custos de atuador final e outras estruturas, atributos de Custo operacional: custo de manutenção, custo do trabalho, e atributos técnicos: repetibilidade, velocidade, capacidade de memória, precisão, programabilidade, número de eixos e *Payload*;
- (Chatterjee, Athawale, & Chakraborty, 2010) citou vários exemplos de critérios utilizados pela bibliografia, e limitou-os aos exemplos dados da seleção de robôs. Na primeira aplicação, os critérios foram: repetibilidade, precisão, *Payload* e velocidade e na segunda aplicação: velocidade, *Payload*, serviço de qualidade do fornecedor, flexibilidade de programação, custo e repetibilidade;
- (Kumar & Garg, 2010) dividiram os parametros importantes para a escolha de robôs em: fatores performantes, como, velocidade, repetibilidade, *Payload* e graus de liberdade, fatores qualitativos do robô, como estabilidade, conformidade e precisão, e fatores de custo, nos quais os autores sugerem que o avaliador aplique sua jurisprudência e adicione ou retire fatores de custo;
- (Rao, Patel, & Parnichkun, 2011) fizeram uma revisão geral dos critérios, mas também limitaram-se aos critérios dos exemplos, onde no exemplo 1 os fatores de decisão foram: *Payload*, repetibilidade, “maximum tip speed”, capacidade de memória e alcance do manipulador. O exemplo 2 contou com os critérios de *Payload*, repetibilidade, velocidade e graus de liberdade. O exemplo 3 utilizou-se das variáveis: repetibilidade, *Payload*, alcance vertical e graus de liberdade;
- (Devi, 2011) baseou seus critérios na revisão feita por (Chu & Lin, 2003) para a decisão de um robô;
- (Sen, Datta, Patel, & Mahapatra, Multi-criteria decision making towards selection of industrial robot: Exploration of PROMETHEE II method, 2015) utilizaram os critérios de custo, *Payload*, repetibilidade e velocidade para 2 estudos de caso. Posteriormente, (Sen, Datta, & Mahapatra, 2016), os autores consideraram critérios objetivos: capacidade, repetibilidade, velocidade máxima na ponta, capacidade da

memória, alcance do manipulador, e critérios não-funcionais: interface homem-máquina, flexibilidade de programação, serviço de contrato com o vendedor, precisão de posicionamento, segurança, performance do sistema, confiança e manutenção.

Além dos autores citados, e dos critérios utilizados por eles, podemos utilizar a revisão feita por (Iç, Yurdakul, & Dengiz, 2013). Com isso, foi possível gerar o Quadro 6 dos critérios utilizados pela literatura.

Quadro 6 - Critérios de seleção de robôs utilizados pela literatura

Critérios			
1.	**Alcance do manipulador**	2.	Interface homem-máquina
3.	**Alcance horizontal**	4.	Manutenção
5.	**Alcance vertical**	6.	Material do robô
7.	**Capacidade de alcance**	*8.*	*Payload*
9.	**Capacidade de memória**	10.	Período de garantia
11.	**Conformidade**	12.	Peso do robô
13.	**Contrato de serviço do fornecedor**	14.	Precisão de posicionamento
15.	**Custo**	16.	Qualidade de serviço do fornecedor
17.	**Desempenho ambiental**	18.	Repetibilidade
19.	**Destreza geométrica**	20.	Rotação básica
21.	**Diâmetro**	22.	Sistema de acionamento
23.	**Elevação**	24.	Sistema de controle
25.	**Erro de repetibilidade**	26.	Sistema de medição de caminho
27.	**Estabilidade**	28.	Tamanho do robô
29.	**Etapas do programa**	30.	Tempo de descanso
31.	**Expectativa de vida**	32.	Tempo de viagem
33.	**Flexibilidade de programação**	34.	Tipo de robô
35.	**Fonte de energia**	36.	Velocidade
37.	**Grau de liberdade**	38.	Velocidade máxima da ponta

Fonte: (O Autor, 2020)

2.3 MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO

Segundo (Belton & Stewart, 2002), toda decisão que tomamos requer o balanceamento de múltiplos fatores (critérios). Às vezes explicitamente, às vezes sem pensamento consciente, de modo que, em certo sentido, todos são bem praticados na tomada de decisões multicritério.

Um estudo de (Miller, 1956) demonstrou que o cérebro humano só é capaz de utilizar um número limitado de variáveis para a decisão. Miller concluiu que toda vez que o número de alternativas fosse aumentador por um fator de dois, ou seja, de duas opções para quatro, de quatro para oito, um bit de informação devia ser adicionado ao nosso cérebro. À medida que aumentamos a quantidade de informações de entrada (critérios/variáveis) maior seria a probabilidade de erros na decisão.

(Belton & Stewart, 2002) explicam que um dos principais objetivos das abordagens *Multiple Criteria Decision Analysis* (MCDA) ou *Multiple Criteria Decision Making* (MCDM ou MMAD em português) é ajudar os tomadores de decisão a organizar e sintetizar informações de uma forma que os levem a se sentirem confortáveis ao tomarem decisões. E, com isso, minimizar o potencial arrependimento pós-decisão, certificando-se de que todos os critérios ou fatores foram devidamente tidos em conta.

Algumas coisas devem ser consideradas quando se fala em métodos MMAD:

I. Esses métodos não vão gerar respostas “corretas”. Eles são utilizados para dar suporte aos gestores, e como dito anteriormente, diminuir o potencial arrependimento pós-decisão. O conceito de um ótimo não existe em uma estrutura de múltiplos critérios (Belton & Stewart, 2002);
II. Os modelos não retiram a subjetividade das escolhas. “A subjetividade é inerente a todas as tomadas de decisão, em particular na escolha dos critérios sobre os quais baseares a decisão, e o "peso" relativo dado a esses critérios” (Belton & Stewart, 2002). A ideia desses modelos é tornar transparente e explícito os critérios utilizados para a decisão.

(Belton & Stewart, 2002) enfatizam os seguintes pontos sobre os modelos MCDA:

I. A MCDA procura levar em conta, de forma explícita, vários critérios conflitantes para auxiliar na tomada de decisões;
II. O processo MCDA ajuda a estruturar o problema;
III. Os modelos utilizados fornecem um foco e uma linguagem para discussão;
IV. O principal objetivo é ajudar os tomadores de decisão a aprender sobre a situação do problema, sobre seus próprios e outros valores, e julgamentos e sobre a organização, síntese e apresentação apropriada

de informações para orientá-los a identificar, frequentemente através de discussões externas, um curso de ação preferencial;

V. A análise serve para complementar e desafiar a intuição, atuando como caixa de ressonância contra a qual as ideias podem ser testadas. Esses modelos não procuram substituir o julgamento intuitivo ou a experiência

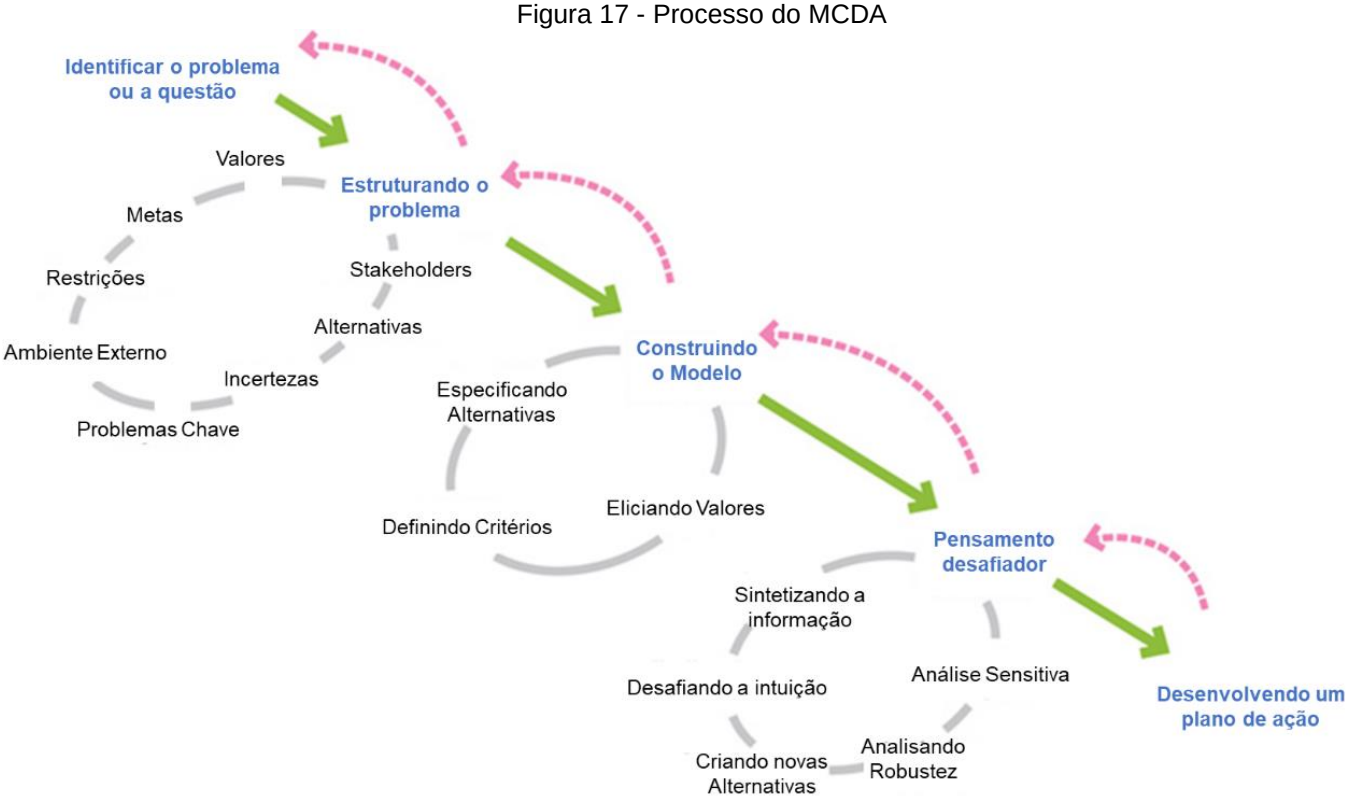
VI. O processo leva a uma decisão mais coerente, justificável e explicável. A análise fornece uma trilha de auditoria para uma decisão;

VII. As abordagens mais úteis são conceitualmente simples e transparentes

VIII. Não obstante, o anterior, habilidades não-triviais são necessárias para fazer uso efetivo mesmo de tais ferramentas simples em um ambiente potencialmente complexo.

A Figura 17 representa a estrutura e as principais etapas do MCDA, desde a identificação do problema, estruturação, construção do modelo com uso para desafiar o pensamento, até o desenvolver de um plano de ação.

Figura 17 - Processo do MCDA



Fonte: adaptado de (Belton & Stewart, 2002)

Desde a idealização histórica do modelo MCDA, inúmeras abordagens foram criadas. Cada abordagem consegue traduzir a solução de um problema para valores e dados visíveis, e cada uma delas tem pontos efetivos e pontos que são insuficientes.

(Velasquez & Hester, 2013) fizeram uma vasta revisão sobre esses modelos, de modo a explicar como cada um funciona, assim como suas limitações, e aplicações. Outros autores, especificamente voltados ao tema de decisão em robôs, usaram modelos MMAD, os mesmos utilizados na revisão dos critérios, e a literatura sobre o tema é extensa. Será utilizada a revisão feita por Velasquez e Hester, em conjunto com as escolhas já feitas por autores no âmbito da robótica, item 2.2, para a seleção dos métodos que podem ser melhor aplicados para a resolução do problema. Após a seleção dos métodos, será feita uma revisão especificamente sobre cada método escolhido.

Velasquez & Hester fizeram a revisão dos seguintes métodos: ***M**ulti-**A**ttribute **U**tility **T**heory* (MAUT), ***A**nalytic **H**ierarchy **P**rocess* (AHP), ***C**ase-**B**ased **R**easoning* (CBR), *Data Envelopment Analysis* (DEA), Fuzzy Set Theory, ***S**imple **M**ulti-**A**ttribute **R**ating **T**echnique* (SMART), ***G**oal **P**rogramming* (GP), *ELECTRE*, *PROMETHEE*, ***S**imple **A**dditive **W**eighting* (SAW) e ***T**echnique for **O**rder **P**references by **S**imilarity to **I**deal **S**olutions* (TOPSIS). Com a revisão da literatura de cada um desses modelos, os dados específicos dos modelos, sem considerar a robótica, foram sintetizados no Quadro 7:

Quadro 7 - Revisão dos Métodos de Tomada de Decisão.

Método	Vantagens	Desvantagens
***Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT)**	Considera a incerteza; pode incorporar preferências	Precisa de múltiplas entradas; preferências precisam ser precisas
***Analytic Hierarchy Process* (AHP)**	Fácil de usar; escalável; estrutura de hierarquia pode facilmente ajustar para caber muitos problemas de tamanho; não é *data-intensive*	Problemas devido à interdependência entre critérios e alternativas; pode levar a inconsistências entre critérios de julgamento e classificação; inversão de classificação
***Case-Based Reasoning* (CBR)**	Não intensivo de dados; requer pouca manutenção; pode melhorar com o tempo; pode se adaptar às mudanças no ambiente	Sensível a dados inconsistentes; requer muitos casos

***Data Envelopment Analysis* (DEA)**	Capaz de lidar com múltiplas entradas e saídas; eficiência pode ser analisada e quantificada	Não lida com dados imprecisos; assume que todas as entradas e saídas são exatamente conhecidas
Fuzzy Set Theory	Permite a entrada imprecisa; considera informações insuficientes	Difícil de desenvolver; pode exigir várias simulações antes de usar
***Simple Multi-Attribute Rating Technique* (SMART)**	Simples; permite qualquer tipo de técnica de atribuição de peso; menos esforço por tomadores de decisão	O procedimento pode não ser conveniente considerando a estrutura
***Goal Programming* (GP)**	Capaz de lidar com problemas de grande escala; pode produzir infinitas alternativas	É a capacidade de ponderar coeficientes; normalmente precisa ser usado em combinação com outros métodos MCDM para ponderar os coeficientes
ELECTRE	Toma incerteza e imprecisão em conta	Seu processo e resultado podem ser difíceis de explicar em termos leigos; superação faz com que os pontos fortes e fracos das alternativas não sejam diretamente identificados
PROMETHEE	Fácil de usar; não requer a suposição de que os critérios são proporcionais	Não fornece um método claro pelo qual atribuir pesos
***Simple Additive Weighting* (SAW)**	Capacidade de compensar entre critérios; intuitivo para os tomadores de decisão; o cálculo é simples não requer softwares complexos	As estimativas reveladas nem sempre refletem a situação real; resultado obtido pode não ser lógico
***Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solutions* (TOPSIS)**	Tem um processo simples; fácil de usar e programar; o número de etapas permanece o mesmo, independentemente do número de atributos	Seu uso da Distância Euclidiana não considera a correlação de atributos; difícil de peso e manter a coerência de julgamento

Fonte: adaptado de (Velasquez & Hester, 2013)

Como dito anteriormente, a revisão sobre os métodos de suporte a tomada de decisão para robôs resultou na seguinte análise:

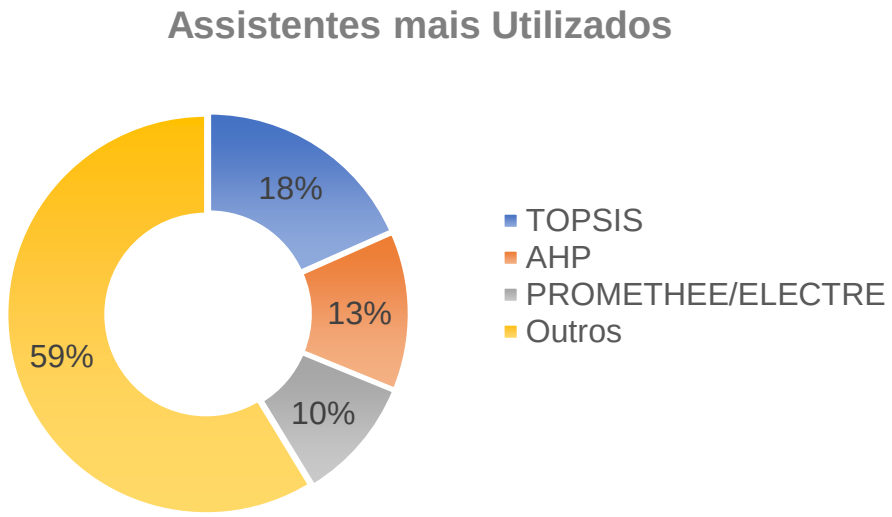
- (Khouja & Booth, 1995) Propuseram um modelo de decisão para a seleção de robôs utilizando análise de cluster *Fuzzy* para identificar robôs com melhor desempenho. Esse modelo considera que o desempenho de um robô, conforme especificado pelo fabricante, é muitas vezes inatingível. O modelo proposto por eles foi testado em um conjunto de dados reais contendo especificações para 27 robôs industriais.
- (Tung, Cheng, & Goh, 1996) Apresentaram um modelo de soma ponderada que revisava e incorporava os valores atribuídos por um grupo de especialistas a diferentes fatores das seleções de robôs. Usando este modelo, eles eliminavam os valores mais altos e mais baixos dos especialistas sobre os pesos, assim como os fatores subjetivos.
- (Zhao, Tsujimura, & Gen, 1996) Introduziram o Algoritmo Genético (GA) para o problema de Seleção de Robôs e Atribuição das Estações de Trabalho.
- (Goh, 1997) Utilizou um modelo baseado no método do processo de hierarquia analítica (AHP) incorporando entradas de vários tomadores de decisão.
- (Parkan & Wu, 1999) Deram ênfase no procedimento *operational competitiveness rating* (OCRA) e em uma ferramenta MADM (TOPSIS). A seleção final foi feita com base nas classificações obtidas pela média dos resultados de OCRA, TOPSIS e um modelo de utilidade.
- (Chu & Lin, 2003) Propuseram um método TOPSIS *Fuzzy* para a seleção do melhor robô. Na TOPSIS *Fuzzy* os atributos são representados por números difusos. Para isso, é realizada uma conversão dos critérios, em que se garante a compatibilidade entre os valores dos critérios objetivos e os valores linguísticos dos critérios não-funcionais.
- (Bhangale, Agrawal, & Saha, 2004) apresentaram a seleção de robôs, com base na abordagem MADM. Os autores utilizavam 83 características que podiam ser aplicadas à tomada de decisão de robôs, e, com base na aplicação desejada, obtinham as variáveis com mais peso para a decisão, e então, aplicavam-nas.

- (Kapoor & Tak, 2005) Propuseram uma metodologia para resolver problemas comuns de seleção de robôs usando uma modificação do AHP convencional, incorporando "variáveis linguísticas difusas" no lugar de números, através de uma interface *Fuzzy*.
- (Bhattacharya, Sarkar, & Mukherjee, 2005) utilizaram um modelo integrado combinando AHP e QFD para o problema de seleção de robôs industriais. E por meio disso, explicaram como os autores são capazes de determinar se a implantação de robôs na indústria ajudava no aprimoramento do desempenho.
- (Rao & Padmanabhan, 2006) desenvolveram uma metodologia baseada em métodos *digraph* e *matrix* para avaliação de robôs industriais alternativos. Eles propuseram um índice de seleção de robôs que avalia e classifica robôs para uma dada aplicação industrial.
- (Kahraman, Çevik, Ates, & Gülbay, 2007) propuseram um modelo TOPSIS hierárquico difuso para a avaliação multicritério dos sistemas robóticos. Segundo eles, "*A seleção de sistemas robóticos industriais é um problema complexo, no qual muitos atributos qualitativos devem ser considerados*. E, por conta disso "*A estrutura hierárquica é uma boa abordagem para descrever um sistema complicado*."
- (Chatterjee, Athawale, & Chakraborty, 2010) tentaram resolver o problema de seleção de robôs para uma dada aplicação industrial utilizando os métodos. "***VI****sekriterijumsko* ***KO****mpromisno* ***R****angiranje*" (VIKOR) "***EL****imination e o* ***E****t* ***C****hoice* ***T****ranslating* ***RE****ality*" (ELECTRE).
- (Kumar & Garg, 2010) desenvolveram um modelo quantitativo determinístico baseado no método *Distance Based Approach* (DBA). Esse modelo reconhece a necessidade e processa as informações sobre a importância relativa dos atributos para uma determinada aplicação do robô.
- (Rao, Patel, & Parnichkun, 2011) propuseram um método de tomada de decisão *Fuzzy* de múltiplos atributos, integrando subjetivo e objetivo para a seleção de robô.
- (Sen, Datta, Patel, & Mahapatra, 2015) fizeram a revisão bibliográfica sobre o tema de tomada de decisão em robôs, e escolheram aplicar o

método PROMETHEE II em seus estudos. Posteriormente, (Sen, Datta, & Mahapatra, 2016) tentaram utilizar novamente o método PROMETHEE II, mas desta vez em conjunto com o FUZZY para que fossem considerados critérios não-funcionais e objetivos na tomada de decisão.

Com essa revisão, e utilizando adicionalmente como base as revisões feitas por (Iç, Yurdakul, & Dengiz, 2013) e (Sen, Datta, Patel, & Mahapatra, 2015), foi possível elaborar um gráfico com a quantidade de vezes que cada método foi utilizado, dentre todas as vezes que foram feitos modelos de tomada de decisão para robôs industriais. O resultado disso pode ser visto no gráfico abaixo.

Figura 18 - Assistentes mais utilizados



Fonte: (O Autor, 2020)

Com a revisão feita, os seguintes métodos se destacaram dentre os demais: a*HP*, *TOPSIS* e *ELECTRE/PROMETHEE*. Primeiramente, pois na revisão dos métodos MMAD utilizados na robótica industrial, os modelos citados acima apareceram com mais utilizações. Isto ocorre pois, são modelos que não precisam de grandes processamentos de dados nem de um grau alto de conhecimento em matemática. Além disso, são modelos altamente flexíveis, podendo ser utilizados em inúmeros casos. Tudo isso favorece sua utilização em meios industriais. Sendo assim, a revisão dos métodos irá abordá-los.

2.3.1 ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

O modelo *Analytic Hierarchy Process* (AHP) foi desenvolvido por Thomas Lorie Saaty entre 1971 e 1975 (Saaty, 1987), e é uma teoria geral de medição que é usada para derivar escalas de razão de comparações pareadas discretas e contínuas.

Como modelos de assistência a tomada de decisão, o AHP necessita de critérios e pesos. Uma vez selecionados critérios para a tomada de decisão, estes são organizados em uma estrutura hierárquica que vai de uma meta geral a critérios, subcritérios e alternativas em níveis sucessivos. Uma regra geral é que a hierarquia dentro do AHP deve ser complexa o suficiente para capturar a situação, mas pequena e ágil o suficiente para ser sensível às mudanças. "*Uma hierarquia não é a árvore de decisão tradicional. Cada nível pode representar um corte diferente no problema*" (Saaty & Katz, 1990), além disso, a hierarquia não precisa que um elemento em um determinado nível sirva como um atributo (ou critério) para todos os elementos no nível abaixo.

De acordo com Saaty, três princípios guiam-nos na resolução de problemas por meio do AHP: decomposição, julgamentos comparativos e síntese de prioridades.

O princípio da decomposição é aplicado estruturando-se um problema onde os problemas de um nível são independentes dos problemas em leveis sucessivos. Indo dos critérios mais gerais e incertos até os mais particulares e concretos. Isso é: um critério de nível 1 tem nele critérios níveis 2, seguidos por critérios níveis 3 nos de nível 2 e assim por diante.

O princípio de julgamentos comparativos é aplicado para gerar comparações de importância relativa entre elementos de um dado nível com critérios/propriedades compartilhadas no nível acima, gerando assim uma matriz correlacionada. Isso é: quanto o critério **X** se sobrepõem ou é sobreposto pelo critério **Y**? Quando o Critério **Y** se sobrepõem ou é sobreposto pelo critério **Z**? A escala utilizada para esse tipo de decisão é dada na Tabela 1. "*Esta escala foi validada para a eficácia, não só em muitas aplicações por um número de pessoas, mas também através de comparações teóricas com um grande número de outras escalas*." (Saaty & Katz, 1990).

O último deles, o princípio da sintetização de prioridades. Segundo Saaty, no AHP, as prioridades são sintetizadas a partir do segundo nível, multiplicando as prioridades locais pela prioridade de seu critério correspondente no nível acima. Isso fornece a prioridade composta ou global desse elemento, que é usado para ponderar

as prioridades locais dos elementos no nível abaixo, em comparação com os outros como critério e assim por diante, no nível inferior.

Tabela 1 - Valores da Escala Fundamental

Intensidade de Importância em uma escala Absoluta	Definição	Explicação
1	Igual Importância	Duas atividades que contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada de uma sobre a outra	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
5	Essencial ou Importância forte	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida e sua dominância é mostrada na prática
9	Extrema Importância	A evidência que favorece uma atividade em detrimento de outra é da mais alta ordem possível de afirmação
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os dois juízos adjacentes	Quando compromisso é necessário
Recíprocos	Se a atividade ***i*** tiver um dos números acima atribuídos a ela quando comparada com à atividade ***j***, então ***j*** terá o valor recíproco quando comparado com ***i***	
Racionais	Razões decorrentes da escala	Se a consistência fosse forçada pela obtenção de valores numéricos ***n*** para abranger a matriz

Fonte: adaptado de (Saaty & Katz, 1990)

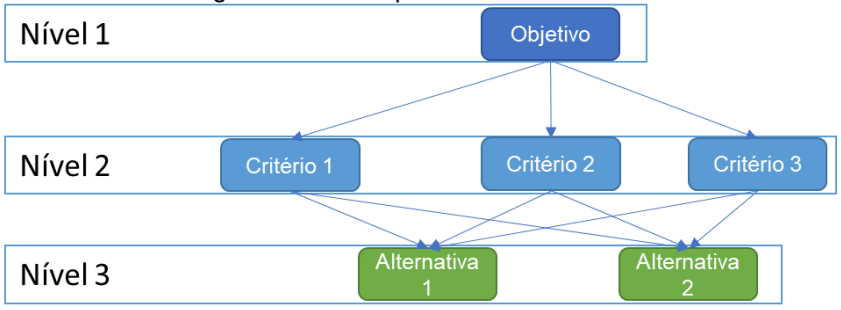
2.3.1.1 Desenvolvimento do método AHP

(Saaty, 2008) definiu passos a serem seguidos para a metodologia de comparação e implantação dos modelos. Esses passos são descritos abaixo:

I. Defina o problema e determine o tipo de conhecimento procurado;
II. Estruture a hierarquia de decisão a partir do topo com o objetivo da decisão, depois os objetivos de uma perspectiva ampla, passando pelos níveis intermediários (critérios dos quais os elementos subsequentes dependem) até o nível mais baixo (que geralmente é um conjunto de alternativas);
III. Construa um conjunto de matrizes de comparação entre pares. Cada elemento em um nível superior é usado para comparar os elementos no nível imediatamente abaixo com relação a ele;
IV. Use as prioridades obtidas nas comparações para ponderar as prioridades no nível imediatamente abaixo. Faça isso para cada elemento. Então, para cada elemento no nível abaixo, adicione seus valores ponderados e obtenha sua prioridade geral ou global. Continue este processo de pesagem e adicione até que as prioridades finais das alternativas no nível mais baixo sejam obtidas.

A Figura 19 serve de exemplo para resolução dos passos I e II propostos. No nível 1 é inserida definição do objetivo, para o nível 2, são os critérios que impactam a decisão, o nível 3 são as alternativas. Note que um modelo pode ter ***N*** níveis com ***N*** critérios/atributos.

Figura 19 - Exemplo de Estrutura AHP



Fonte: (O Autor, 2020)

A próxima etapa é realizar o conjunto de comparações. Essas comparações devem ser feitas para todos os níveis. Ou seja: No nível 2: critério 1 vs critério 2 vs critério 3, Tabela 2. E no nível 3: alternativa 1 vs alternativa 2 para cada um dos critérios, elas podem ser vistas nas Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 2 - Comparação em pares 1

Comparação em pares	Critério 1	Critério 2	Critério 3
Critério 1	1	3	5
Critério 2	1/3	1	3
Critério 3	1/5	1/3	1

Fonte: (O Autor, 2020)

Tabela 3 - Comparação em pares 2

Comparação em pares Critério 1	**Alternativa 1**	**Alternativa 2**
Alternativa 1	1	5
Alternativa 2	1/5	1

Fonte: (O Autor, 2020)

Tabela 4 - Comparação em pares 3

Comparação em pares Critério 2	**Alternativa 1**	**Alternativa 2**
Alternativa 1	1	3
Alternativa 2	1/2	1

Fonte: (O Autor, 2020)

Tabela 5 - Comparação em pares 4

Comparação em pares Critério 3	Alternativa 1	Alternativa 2
Alternativa 1	1	1/4
Alternativa 2	4	1

Fonte: (O Autor, 2020)

Essas comparações significam que:

- Comparando o critério 1 com o critério 2, o critério 1 tem uma importância moderadamente maior que o 2;

- Comparando o critério 1 com o critério 3, o critério 1 tem uma importância mais forte que o 3;
- Comparando o critério 2 com o critério 3, o critério 2 tem uma importância moderadamente maior que o 3.

A comparação entre as alternativas significou que:

- Quando ambos são avaliados no critério 1, a alternativa 1 tem uma importância mais forte que a alternativa 2;
- Quando ambos são avaliados no critério 2, a alternativa 1 tem uma importância moderadamente maior que a alternativa 2;
- Quando ambos são avaliados no critério 3, a alternativa 2 tem uma importância intermediária entre moderadamente maior e mais forte que a alternativa 1.

Após montadas as matrizes, é preciso normalizá-las. O processo de normalização da matriz ocorre através da divisão de cada elemento da matriz pelo somatório da sua coluna, conforme a Equação (1), e, depois disso, calcula-se o auto vetor, também conhecido como matriz de pesos relativos, que é responsável por dar os pesos relativos à cada critério, dado pela Equação (2) e será a última coluna das Tabela 6 à Tabela 9.

$$Aij = \frac{Aij}{\sum_{i=1}^{n} Aij} \tag{1}$$

$$Wi = \frac{\sum_{i=1}^{n} Aij}{n} \tag{2}$$

Tabela 6 - Normalização 1

Normalização	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Pesos Relativos
Critério 1	0,65	0,69	0,56	0,63
Critério 2	0,25	0,23	0,33	0,26
Critério 3	0,15	0,08	0,11	0,11

Fonte: (O Autor, 2020)

Tabela 7 - Normalização 2

Normalização Critério 1	Alternativa 1	Alternativa 2	Pesos Relativos
Alternativa 1	1	5	0,83
Alternativa 2	1/5	1	0,17

Fonte: (O Autor, 2020)

Tabela 8 - Normalização 3

Normalização Critério 2	Alternativa 1	Alternativa 2	Pesos Relativos
Alternativa 1	1	3	0,75
Alternativa 2	1/3	1	0,25

Fonte: (O Autor, 2020)

Tabela 9 - Normalização 4

Normalização Critério 3	Alternativa 1	Alternativa 2	Pesos Relativos
Alternativa 1	1	1/4	0,2
Alternativa 2	4	1	0,8

Fonte: (O Autor, 2020)

Com as matrizes normalizadas, o próximo passo é realizar a multiplicação dos pesos dos critérios, pelos pesos de cada alternativa, que podem ser vistos nas Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 10 - Pesos globais 1

Normalização Critério 1	Pesos Globais
Alternativa 1	0,52
Alternativa 2	0,11

Fonte: (O Autor, 2020)

Tabela 11 - Pesos globais 2

Normalização Critério 2	Pesos Globais
Alternativa 1	0,20
Alternativa 2	0,06

Fonte: (O Autor, 2020)

Tabela 12 - Pesos globais 3

Normalização Critério 3	Pesos Globais
Alternativa 1	0,02
Alternativa 2	0,09

Fonte: (O Autor, 2020)

O último passo é realizar a média dos pesos globais para cada uma das alternativas, e com isso ver qual alternativa teve o melhor resultado. Resultando na Tabela 13.

Tabela 13 - Matriz de Resultados

Matriz Resultado	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Média dos Pesos
Alternativa 1	0,52	0,20	0,02	0,74
Alternativa 2	0,11	0,06	0,09	0,26

Fonte: (O Autor, 2020).

Com isso, é possível dizer que a alternativa 1 é a que possui os melhores resultados para a análise feita.

2.3.2 *TECHNIQUE FOR ORDER PREFERENCES BY SIMILARITY TO IDEAL SOLUTIONS* (TOPSIS)

O método TOPSIS foi proposto por (Hwang & Yoon, 1981) como um método que escolhesse uma alternativa que estivesse o mais próximo possível da solução ideal positiva e o mais distante possível da solução ideal negativa. Basicamente a solução ideal será formada tomando-se os melhores valores alcançados pelas alternativas durante a avaliação em relação a cada critério de decisão benéfico, enquanto a solução ideal negativa é feita de forma similar, tomando-se os piores

valores atingíveis dos critérios maléficos, como por exemplo custo (Cengiz, 2008); (Krohling & de Souza, 2011).

O desenvolvimento do método será explicado abaixo:

Primeiramente define-se uma matriz de decisão D (Equação (3)) que corresponde ao desempenho das alternativas conforme o vetor peso (W) de cada critério, que é dado por $W = [w_1, w_2, \ldots, w_3]$. A matriz de decisão será mostrada abaixo.

$$D = \begin{array}{c} \\ A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} C_1 & C_2 & \ldots & C_j & \ldots & C_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \ldots & d_{1j} & \ldots & d_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{i1} & d_{i2} & \ldots & d_{ij} & \ldots & d_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \ldots & d_{nj} & \ldots & d_{nm} \end{bmatrix} \end{array} \tag{3}$$

Após isso, é necessário normalizar e ponderar a matriz de decisão D. Os elementos da matriz normalizada $N = [n_{ji}]$ são dados pela Equação (4).

$$n_{ji} = \frac{w_j d_{ji}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n} w_j d_{ij}^2}} \tag{4}$$

O próximo passo é determinar a solução ideal positiva (A^+) e a solução ideal negativa (A^-) de acordo com as Equações (5) e (6)

$$A^+ = \left\{ {}^{MAX}_{j} n_{ij} \middle| \, j = 1, 2, \ldots, m \right\} = \left\{ n_1^+, \ldots, n_j^+, \ldots, n_m^+ \right\} \tag{5}$$

$$A^- = \left\{ {}^{MIN}_{j} n_{ij} \middle| \, j = 1, 2, \ldots, m \right\} = \left\{ n_1^-, \ldots, n_j^-, \ldots, n_m^- \right\} \tag{6}$$

Para cada alternativa avaliada, calcula-se a distância D_i^+ entre os valores de desempenho normalizados da matriz N, com os valores da solução ideal positiva. A distância D_i^+ é dada pela Equação (7)

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(n_{ij} - n_j^+ \right)^2} \tag{7}$$

Para cada alternativa avaliada, calcula-se a distância D_i^- entre os valores de desempenho normalizados da matriz N, com os valores da solução ideal negativa. A distância D_i^- é dada pela equação (8).

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(n_{ij} - n_j^-\right)^2} \tag{8}$$

O penúltimo passo é calcular o coeficiente de aproximação CC_i, que corresponde ao desempenho global da alternativa i. Em outras palavras, a pontuação final. O coeficiente é calculado pela equação (9).

$$CC_i = \frac{D_i^-}{(D_i^+ - D_i^-)} \tag{9}$$

O passo final consiste em classificar as alternativas em ordem decrescente segundo os valores do coeficiente de aproximação CC_i, definido no intervalo $[0{,}0{,}1{,}0]$. As melhores alternativas são aquelas em que o desempenho global for mais próximo de 1.

2.3.3 ELECTRE E PROMETHEE

Nessa secção serão abordados os dois métodos de assistência a tomada de decisão. Os dois métodos estão juntos, tanto neste capitulo quanto na seleção dos métodos os quais a revisão levaria em conta, pois, segundo (Gomes & Gomes, 2004), o PROMETHEE é uma ramificação da família ELECRE, com maior resistência a variação de parâmetros, e, segundo (Velasquez & Hester, 2013) o PROMETHEE é semelhante ao ELECTRE, pois ambos tem várias iterações e são métodos de sobre classificação.

2.3.3.1 ELECTRE

O método *Elimination at Choix Traduisant la Réalite* (ELECTRE) recebeu várias derivações desde sua primeira aparição, com o nome ELECTRE I, em 1965 quando Bernard Roy o propôs. O grupo de métodos ELECTRE baseiam-se no conceito de relações de superação ou sobre classificação, distinguidos em razão da problemática, quantidade de informações inter e intra critérios e relações de superação, utilizadas em sua aplicação (Gomes & Gomes, 2004).

(Gomes & Gomes, 2004) explicam que os métodos ELECTRE utilizam um sistema de pesos para mensurar a importância de cada critério na visão do decisor. O objetivo disso é construir índices de concordância, utilizados na avaliação das vantagens, de uma alternativa sobre as outras, e índices de discordância, que medem as desvantagens, de uma alternativa sobre as outras.

(Roy, Multicriteria Methodology for Decision Aiding, 1996) previa que o resultado pretendido em determinado problema poderia ser identificado entre quatro tipos de problemáticas de referência, categorizadas da seguinte forma:

I. Problemática de escolha (P.α): tem como objetivo auxiliar na escolha da melhor ação, orientando a investigação no sentido de encontrar um subconjunto de ações tão pequeno quanto possível;
II. Problemática de Classificação (P.β): tem como objetivo a alocação de cada ação em uma classe, definidas a priori a partir de normas aplicáveis ao conjunto de ações;
III. Problemática de Ordenação (P.γ): tem como objetivo a construção de um ranking das alternativas em ordem decrescente de preferência;
IV. Problemática de Descrição (P.δ): em como objetivo apoiar a decisão através de uma descrição das ações e de suas consequências.

Como dito anteriormente, o método ELECTRE I acabou por ser derivado em outros métodos ELECTRE, onde, os autores que o derivaram, tentaram evoluí-lo em características das quais achavam importantes. Esses métodos podem ser vistos na Tabela 14.

Tabela 14 - Métodos ELECTRE

Versão	Autor(es)	Ano	Problemática	Tipo de Critério	Utiliza Pesos para critério?
I	Roy	1968	Escolha	Verdadeiro	Sim
IS	Roy e Skalka	1985	Escolha	Pseudo	Sim
II	Roy e Bertier	1973	Ordenação	Verdadeiro	Sim
III	Roy	1978	Ordenação	Pseudo	Sim
IV	Roy e Hugonnard	1982	Ordenação	Pseudo	Não
TRI	Yu Wei	1992	Classificação	Pseudo	Sim

Fonte: adaptado de (Almeida, 2011)

(Gomes & Gomes, 2004) explicam que o ELECTRE I esclarece a decisão através da escolha de um subconjunto, que apresenta a máxima restrição, e contemple as melhores alternativas, com a construção das relações de sobre classificação por meio da comparação entre pares das alternativas através de índices de **C**oncordância (C) e **D**iscordância (D), onde lê-se:

- $C(a,b)$ = índice de concordância com a afirmativa aSb;
- $D(a,b)$ = índice de discordância com a afirmativa aSb.

Esses índices são dados pelas Equações (10) e (11)(Figueira, Greco, & Ehrgott, 2005).

$$C(a,b) = \sum_{\{j: g_j(a) \geq g_j(b)\}} w_j \tag{10}$$

$$D(a,b) = \underset{\{j: g_j(a) < g_j(b)\}}{MAX} [g_j(b) - g_j(a)] \tag{11}$$

Onde:

- $g_j(a)$ é o desempenho da alternativa a no critério j;
- $g_j(a)$ é o desempenho da alternativa b no critério j;
- w_j é o peso normalizado do critério j (somatório dos pesos é igual a 1).

Assim sendo, na primeira fase do ELECTRE I é feita uma comparação par a par entre todas as alternativas. Após isso, os índices calculados são comparados com limiares de concordância (p), normalmente entre $0{,}5$ e 1, e discordância (q), normalmente entre 0 e $0{,}49$ para que sejam estabelecidas relações de sobre classificação, conforme descrito na Equação (12).

$$aSb \text{ se e somente se } \begin{cases} C(a,b) \geq p \\ D(a,b) \leq q \end{cases} \tag{12}$$

Com o intuito de exemplificar uma tabela de pesos/critérios/desempenho, a tabela de performance abaixo foi elaborada na Tabela 15.

Tabela 15 - Tabela de Performance

	g_1	g_2	g_3
a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	$g_3(a_1)$
a_2	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	$g_3(a_2)$
a_3	$g_1(a_3)$	$g_2(a_3)$	$g_3(a_3)$
Pesos	w_1	w_2	w_3

Fonte: (O Autor, 2020)

O desenvolvimento do método ELECTRE I, de forma a verificar seu funcionamento, pode ser vista no estudo de caso feito por (Siqueira & Filho, 2011).

O ELECTRE IS derivou do ELECTRE I, com o objetivo de selecionar um subconjunto de alternativas potenciais, utilizando a lógica *Fuzzy* e pseudo critérios. Além disso, o método emprega limites de preferência e indiferença não nulos e um reforço do poder de veto (Figueira, Greco, & Ehrgott, 2005).

Pode-se dizer que o ELECTRE II também derivou do ELECTRE I, porém, as definições de concordância e discordância do ELECTRE II diferem daquelas apresentadas para o ELECTRE I (Goicoechea, Hansen, & Duckstein, 1982). As concordâncias $C(a,b)$ e discordâncias $D(a,b)$ podem ser calculadas pelas equações (13) e (14).

$$C(a,b) = \frac{1}{W} \sum_{\{\forall j : g_j(a) \geq g_j(b)\}} w_j \ \ onde\ W = \sum w_j \qquad (13)$$

$$D(a,b) = max_j \left(0; \frac{g_j(a) - g_j(b)}{\delta_j}\right) \ onde\ \delta = \underset{\{\forall j\}}{MAX} \left[g_j(b) - \ g_j(a)\right] \qquad (14)$$

Onde:

- $g_j(a)$ é o desempenho da alternativa a no critério j;
- $g_j(a)$ é o desempenho da alternativa b no critério j;
- δ_j é a diferença entre o melhor desempenho e o pior desempenho no critério j, considerando todas as alternativas.

De forma simples, o ELECTRE II ordena um conjunto de alternativas, da melhor para a pior, sendo então desenvolvido para resolução de problemas de ordenação (Roy, Multicriteria Methodology for Decision Aiding, 1996). São utilizados os conceitos de concordância e discordância para ordenar o conjunto de alternativas. A ordenação é obtida através de duas pré-ordens construídas a partir das relações de sobre classificação forte e fraca (Chaves, Júnior, Pereira, & de Mello, 2010).

O método ELECTRE III derivou do ELECTRE II e tem por finalidade ordenar alternativas. Entretanto, diferente do método anterior, (Roy, 1978) incorporou a metodologia *Fuzzy* na construção do cálculo da ordenação de alternativas, permitindo

a criação de pseudocritérios. A abordagem *Fuzzy* aplicada nesta versão permite a inclusão das imprecisões e incertezas do processo de tomada de decisões, fixando os limiares de preferência e indiferença. O modelo de superação do ELECTRE III é particularmente adequado para ajudar na escolha entre alternativas de projeto com base principalmente em critérios ambientais (Rogers & Bruen, 1998). A ordenação de alternativas da melhor para a pior é conseguida por meio da introdução de ponderações nos critérios.

. A derivação ELECTRE IV foi criada por (Roy & Hugonnard, 1982), e segundo os autores, foi criada especificamente para a elaboração de um *ranking* de 12 projetos de extensão de linhas suburbanas no sistema de metrô de Paris, baseando-se nos conceitos de "pseudo-critério" e "sobre classificação", o método leva a uma classificação parcial final estabelecida sem qualquer tipo de ponderação dos critérios. De forma simples, a versão ELECTRE IV, tem como objetivo ordenar alternativas da melhor para a pior, assim como o método ELECTRE II e ELECTRE III, mas é aplicada a problemas em que não se pode introduzir qualquer ponderação nos critérios e/ou que o agente de decisão não queira determinar pesos ou critérios.

Por último, o ELECTRE TRI. Seja A um conjunto de alternativas avaliadas de acordo com n critérios $g_i: A \to \mathbb{R}, \mathrm{i} \in \mathrm{N} = \{1, \ldots, n\}$. Observa-se $g_i(a)$ como a performance da alternativa a no critério i. Cada critério i, se associa um peso $w_i \geq 0$ (supondo-se $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$). Dado o critério $i \in N$, o índice parcial de concordância $c_i: A\ x\ A \to [0,1]$ é definido pela Equação 15.

$$c_i(a,b) = \begin{cases} 1\ se\ g_i(a) - g_i(b) \geq 0 \\ 0, \quad caso\ contrário \end{cases} \tag{15}$$

Os valores c_i serão agregados para obter-se o índice de concordância (global) $c: A\ x\ A \to \mathbb{R}$, definido pela Equação (16)

$$C(a,b) = \sum_{i=1}^{n} w_i c_i(a,b) \tag{16}$$

A relação de sobreposição S_λ é então uma relação binária em A definido pela Equação (17).

$$aS_\lambda b \text{ se e somente se } c(a,b) \geq \lambda \tag{17}$$

Ou $\lambda \in [0,1]$ é chamado de limiar de maioridade $\lambda \geq \frac{1}{2}$.

Considere as categorias ordenadas $C^1, C^2, \ldots, C^r, C^1 \ll C^r$. Cada categoria é limitada por dois perfis π^k e π^{k+1} tais que π^{k+1} domina π^k.

Para atribuir uma alternativa a à uma determinada categoria, o método ELETRE TRI primeiro propõe derivar k de $r + 1$ para o primeiro valor k tal que $aS_\lambda \pi^k$. Então ele afetará a para C^k.

De forma resumida, o ELECTRE TRI atribui alternativas a categorias predefinidas, que possuem limites superiores e inferiores. A atribuição de uma alternativa a resulta da comparação de um a com os perfis que definem os limites das categorias (Mousseau, Slowinski, & Zielniewicz, 2018).

2.3.3.2 PROMETHEE

O PROMETHEE I (*ranking* parcial) e o PROMETHEE II (*ranking* completo) foram desenvolvidos por Jean-Pierre Brans e apresentados pela primeira vez em 1982 (Brans, 1982). Após o PROMETHEE I e II, Brans e Mareschal desenvolveram o PROMETHEE III (*ranking* baseado em intervalos) e PROMETHEE IV (caso contínuo). Além disso, em 1988, propuseram o módulo interativo visual GAIA responsável por uma representação gráfica/geométrica, que apoia a metodologia PROMETHEE (Mareschal & Brans, Geometrical representations for MCDA, 1988). Em 1992 e 1996, J. P. Brans e B. Mareschal sugeriram duas extensões: PROMETHEE V (MCDA incluindo restrições de segmentação) (Mareschal & Brans, 1992) e PROMETHEE VI (modelando o cérebro humano) (Brans, 1996).

De forma geral, os métodos PROMETHEE são descritos na literatura como:

1) PROMETHEE I - Pré-ordem parcial das alternativas, destinada à problemática de ordenação;
2) PROMETHEE II - Estabelece uma pré-ordem completa entre as alternativas, destinada à problemática de ordenação;
3) PROMETHEE III - Ampliação da noção de indiferença, tratamento probabilístico dos fluxos (preferência intervalar);
4) PROMETHEE IV - Pré-ordem completa ou parcial, destinada à problemática de escolha e ordenação em situações onde o conjunto de soluções viáveis é contínuo;

5) PROMETHEE V - Nessa implementação, após estabelecer uma ordem completa entre as alternativas (PROMETHEE II), são introduzidas restrições, identificadas no problema, para as alternativas selecionadas; incorpora-se uma filosofia de otimização inteira;
6) PROMETHEE VI - Pré-ordem completa ou parcial. Problemática de escolha e ordenamento. Destinado às situações em que o decisor não consegue estabelecer um valor fixo de peso para cada critério;
7) PROMETHEE GAIA - Extensão dos resultados do PROMETHEE, através de um procedimento visual e interativo.

Abaixo serão descritos alguns princípios dos métodos PROMETHEE, conforme explicado em (Brans & Vincke, 1985); (Brans & de Smet, 2016).

Primeiramente os autores falam sobre a extensão da noção de critério, baseada na introdução de uma função de preferência, que permita a preferência do tomador de decisão por uma ação a em relação a b. Esta função será definida separadamente para cada critério e seu valor será entre 0 e 1. Quanto menor a função, maior a indiferença do decisor; quanto mais próximo de 1, maior sua preferência. No caso de preferência estrita, a função de preferência será 1. Considerando um problema multicritério ($Max\{f_1(a), f_2(a), \ldots, f_h(a), \ldots, f_k(a) |\ a \in K\}$), onde cada critério tem que ser maximizado, e seja f (•) um critério particular e a e b duas ações particulares de K (conjunto de possíveis soluções ou ações). A função de preferência associada $P(a, b)$ de a em relação a b será definida pela equação (18).

$$P(a,b) = \begin{cases} 0 & se \quad f(a) \leq f(b), \\ p[f(a), f(b)] & se \quad f(a) > f(b). \end{cases} \tag{18}$$

Para casos concretos, parece razoável escolher, para p (•), funções como definidas pela Equação (19):

$$p[f(a), f(b)] = p[f(a) - f(b)] \tag{19}$$

dependendo da diferença entre os valores $f(a)$ e $f(b)$.

Os autores definem seis tipos de funções que abrangem a maioria dos casos que ocorrem nas aplicações práticas. Para cada critério, apenas alguns parâmetros, que segundo eles deve ser no máximo de 2, devem ser identificados pelo decisor.

Para indicar claramente as áreas de indiferença na vizinhança de $f(b)$, usa a equação (20).

$$x = f(a) - f(b), \tag{20}$$

e representa-se graficamente a função $H(x)$, definida na Equação 21.

$$H(x) = \begin{cases} P(a,b), & x \geq 0 \\ P(b,a), & x \leq 0 \end{cases} \tag{21}$$

Para estimar o valor de $P(a,b)$, são oferecidas ao decisor seis formas de curvas para a escolha de qual é a melhor para a análise de cada critério, indicando a intensidade da preferência da diferença $f(a) - f(b)$. As seis formas de critérios gerais para o PROMETHEE serão mostradas abaixo. Cada procedimento é feito de forma separada para cada critério.

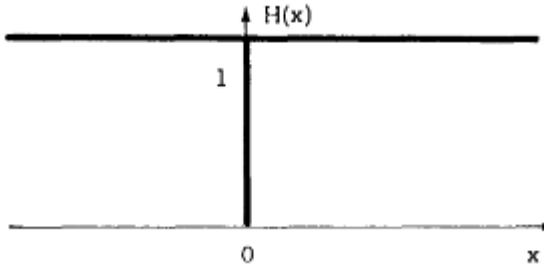
1. *Função Tipo 1: critério Usual*

Nesse caso a Equação (22).

$$p(x) = \begin{cases} 0 & \forall x \leq 0, \\ 1 & \forall x > 0; \end{cases} \tag{22}$$

há indiferença entre a e b somente quando $f(a) = f(b)$. Como esses valores são diferentes, o tomador de decisão tem uma preferência estrita pela ação que tem o maior valor. Sua função de preferência é igual a 1 e $H(x)$ é dado pela Figura 20 - Critério do Tipo 1Figura 20.

Figura 20 - Critério do Tipo 1



Fonte: (Brans & Vincke, 1985)

Se o tomador de decisão identificar o critério $f(\bullet)$ como um critério do tipo 1, nenhum parâmetro deve ser definido. Este tipo não inclui uma extensão, dando a

oportunidade de o tomador de decisão usar o critério em seu sentido usual quando necessário.

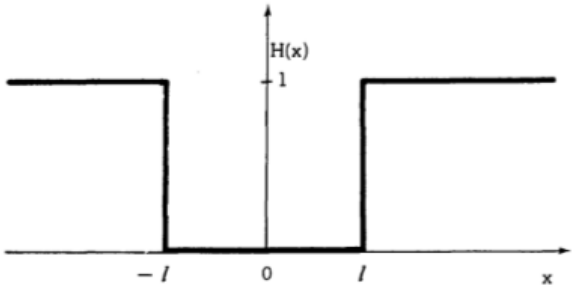
2. *Função Tipo 2: Pseudo Critério*

Nesse caso a Equação (23).

$$p(x) = \begin{cases} 0 & \text{x} \leq 1, \\ 1 & \text{x} > 1; \end{cases} \tag{23}$$

Para o critério particular f (•), a e b são indiferentes, desde que $f(a) - f(b)$ não exceda 1; caso contrário, a preferência se torna estrita. Este tipo de critério estendido enfatiza a noção de semi-ordem. A função $H(x)$ é representado pela Figura 21.

Figura 21 - Função do Tipo 2



Fonte: (Brans & Vincke, 1985)

Quando o decisor identifica o critério f (•) como sendo do Tipo II, apenas o parâmetro 1 deve ser definido.

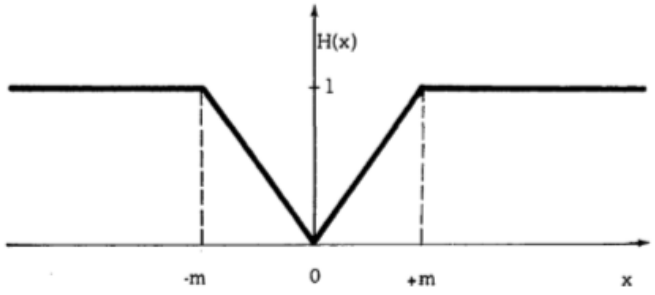
3. *Função Tipo 3: critério com Preferência linear*

Neste caso a Equação (24).

$$p(x) = \begin{cases} x/m & \text{x} \leq \text{m}, \\ 1 & \text{x} \geq \text{m}; \end{cases} \tag{24}$$

Esse tipo de critério permite que o tomador de decisão prefira progressivamente a a b para desvios progressivamente maiores entre $f(a)$ e $f(b)$. A intensidade da preferência aumenta linearmente até que este desvio seja igual a m, após esse valor a preferência é rigorosa. Neste caso, $H(x)$ é representado da seguinte forma:

Figura 22 – Função do Tipo 3



Fonte: (Brans & Vincke, 1985)

Se o tomador de decisão considerar que um determinado critério f (•) é do Tipo III, ele tem apenas que definir o valor m a partir do qual a preferência estrita é considerada.

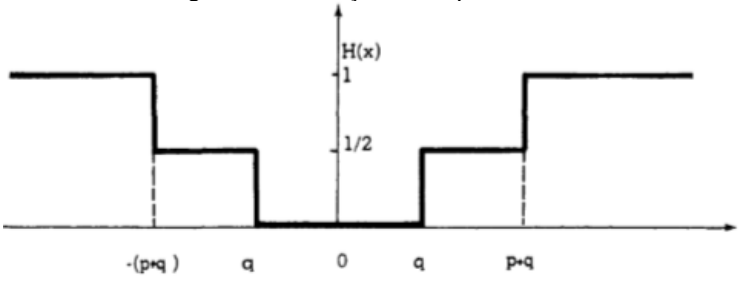
4. *Função Tipo 4: critério de Nível*

Neste caso a Equação (25).

$$p(x) = \begin{cases} 0, & \mathrm{x} \leq \mathrm{q}, \\ 1/2\,, & \mathrm{q} < \mathrm{x} \leq \mathrm{q} + \mathrm{p}, \\ 1, & x > q + p \end{cases} \qquad (25)$$

Neste caso, a e b são considerados como indiferentes quando $f(a) - f\,(b)$ não excede q. Entre q e $q + p$ a preferência é fraca (1/2). Após esse valor a preferência torna-se estrita. Essa extensão pode ser comparada com o pseudo-critério, embora consideremos aqui a preferência fraca como uma intensidade e não como uma hesitação entre indiferença e preferência estrita. Neste caso, $H(x)$ é representado da seguinte forma:

Figura 23 - Função do Tipo 4



Fonte: (Brans & Vincke, 1985)

O tomador de decisão pode fixar q e p quando sente que o critério particular f (•) é do Tipo 4.

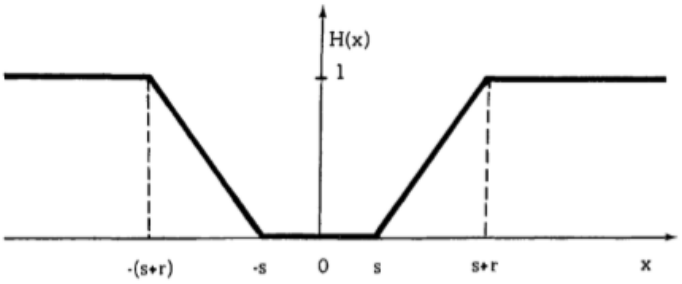
5. *Função Tipo 5: critério com Preferência Linear e Área de Indiferença*

Neste caso a Equação (26).

$$p(x) = \begin{cases} 0, & \text{x} \leq \text{s}, \\ (x-s)/r, & \text{s} \leq \text{x} \leq \text{s} + \text{r}, \\ 1, & x \geq s + r \end{cases} \tag{26}$$

Neste caso, o decisor considera que a e b são completamente indiferentes, desde que $f(a) - f(b)$ não exceda s. Acima desse valor, a preferência cresce progressivamente até que esse desvio seja igual a $s + r$. Neste caso, $H(x)$ é representado pela Figura 24.

Figura 24 - Função do Tipo 5



Fonte: (Brans & Vincke, 1985)

Dois parâmetros têm que ser definidos quando um critério f (•) foi identificado como sendo deste tipo.

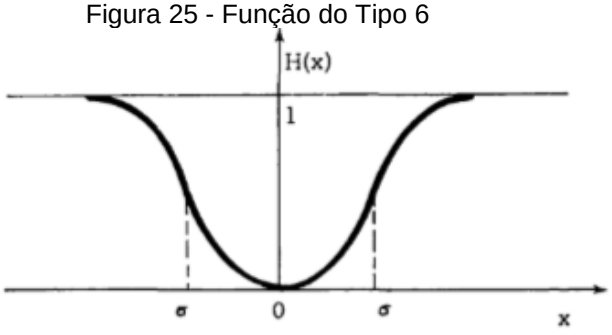
6. *Função Tipo 6: critérios Gaussianos*

Neste caso a equação (27).

$$p(x) = \begin{cases} x/m & \text{x} \leq 0, \\ 1 - e^{-x^2/2\sigma^2} & \text{x} \geq 0; \end{cases} \tag{27}$$

Se um critério é do tipo gaussiano, a preferência do decisor ainda aumenta com o desvio x. O valor de a pode ser fixado de acordo com a experiência obtida com a distribuição normal nas estatísticas. O valor de a é a distância entre a origem e o ponto de inflexão da curva. Neste caso, $H(x)$ é representado pela Figura 25.

Figura 25 - Função do Tipo 6



Fonte: (Brans & Vincke, 1985)

Neste caso particular, apenas o valor de σ deve ser definido pelo decisor. Com esses tipos considerados, os autores acreditam que é possível tratar a maior parte dos casos encontrados na prática, mas eles complementam que se for necessário, funções mais complexas podem ser consideradas.

2.3.3.2.1 PROMETHEE I (*RANKING* PARCIAL)

A classificação parcial PROMETHEE I (P^I, I^I, R^I) é obtida a partir dos fluxos de superação positivos e negativos, como demonstrado na Equação (28). Ambos os fluxos geralmente não induzem os mesmos rankings. O método PROMETHEE I é o cruzamento deles.

$$\begin{cases} aP^Ib & se \begin{cases} \phi^+(a) > \phi^+(b)\ e\ \phi^- < \phi^-, & ou \\ \phi^+(a) = \phi^+(b)\ e\ \phi^- < \phi^-, & ou \\ \phi^+(a) > \phi^+(b)\ e\ \phi^- = \phi^-; \end{cases} \\ aI^Ib & se \quad \phi^+(a) = \phi^+(b)\ e\ \phi^- = \phi^-; \\ aR^Ib & se \begin{cases} \phi^+(a) > \phi^+(b)\ e\ \phi^- > \phi^-, & ou \\ \phi^+(a) < \phi^+(b)\ e\ \phi^- < \phi^-; \end{cases} \end{cases} \tag{28}$$

Onde P^I, I^I, R^I, respectivamente, representam: preferência, indiferença e incomparabilidade.

Quando, aP^Ib, uma maior potência de a está associada a uma fraqueza menor de a em relação a b. A informação de ambos os fluxos de superação é consistente e pode, portanto, ser considerada como certa.

Quando aI^Ib, todos os fluxos positivos e negativos são iguais.

Quando $aR^I b$, um poder superior de uma alternativa está associado a uma fraqueza mais baixa da outra. Isso geralmente acontece quando a é boa em um conjunto de critérios em que b é fraco e, inversamente, b é bom em outros critérios nos quais a é fraca. Nesse caso, a informação fornecida por ambos os fluxos não é consistente.

Os autores também deixam claro que o ranking PROMETHEE I não decidirá qual ação é melhor em cada casos, essa decisão cabe ao tomador de decisão.

2.3.3.2.2 PROMETHEE II (*RANKING* COMPLETO)

O PROMETHEE II consiste no ranking completo (P^{II}, I^{II}). Muitas vezes, é o caso que o decisor solicita uma classificação completa, ordenada.

Primeiramente é normalizada a matriz de decisão, usando-se:

Para critérios benéficos, a Equação (29).

$$R_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \tag{29}$$

Para critérios não benéficos, a Equação (30)

$$R_{ij} = \frac{\max(X_{ij}) - X_{ij}}{max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \tag{30}$$

Após isso, realiza-se a diferença entre cada uma das alternativas em comparação as outras, par a par. Para que, em seguida, as funções de preferência sejam feitas. Como em muitos casos, em aplicações, é difícil para o decisor especificar uma função de preferência, (Athawale & Chakraborty, A comparative study on the ranking performance of some multi-crteria decision-making methods for industrial robot selection, 2011) e (Athawale & Chakraborty, 2010) propuseram as Equações (31) e (32).

$$P(a,b) = 0 \quad se\ R_{aj} \leq R_{bj} \tag{31}$$

$$P(a,b) = \left(R_{aj} - R_{bj}\right) \ \ se\ R_{aj} > R_{bj} \tag{32}$$

Com as funções de preferência, calcula-se a função de preferência agregada, levando em conta os pesos dos critérios, como demonstrado na Equação (33).

$$\prod(a,b) = \left[\frac{\sum_{j=1}^{n} W_j * P_j(a,b)}{\sum_{j=1}^{n} W_j}\right] \tag{33}$$

A rede de sobreposição e ranqueamento pode ser considerada pelas equações (34), (35) e (36):

$$\phi(a) = \phi^{+}(a) - \phi^{-}(a) \tag{34}$$

Onde:

$$\phi^{+}(a) = \frac{1}{n-1}\sum_{b=1}^{n}\prod(a,b) \tag{35}$$

$$\phi^{-}(a) = \frac{1}{n-1}\sum_{b=1}^{n}\prod(b,a) \tag{36}$$

Onde n é o número de alternativas. O fluxo de saída ϕ^{+} expressa quando uma alternativa domina uma outra alternativa. Enquanto o fluxo de entrada ϕ^{-} demonstra quando uma alternativa é dominada por outras alternativas.

É o equilíbrio entre os fluxos de superação positivos e negativos. Quanto maior o fluxo líquido, melhor a alternativa, de modo que (Equação (37)):

$$\begin{cases} aP^{II}b & se \quad \phi(a) > \phi(b), \\ aI^{II}b & se \quad \phi(a) = \phi(b). \end{cases} \tag{37}$$

Quando o PROMETHEE II é considerado, todas as alternativas são comparáveis. Nenhuma incomparabilidade permanece, mas a informação resultante pode ser mais disputável porque mais informações são perdidas considerando a diferença $\phi(a) = \phi^{+}(a) - \phi^{-}(a)$.

As seguintes propriedades são mantidas, conforme demonstrado na Equação 38.

$$\begin{cases} -1 \leq \phi(a) \leq 1 \\ \sum_{x \in A} \phi(a) = 0 \end{cases} \tag{38}$$

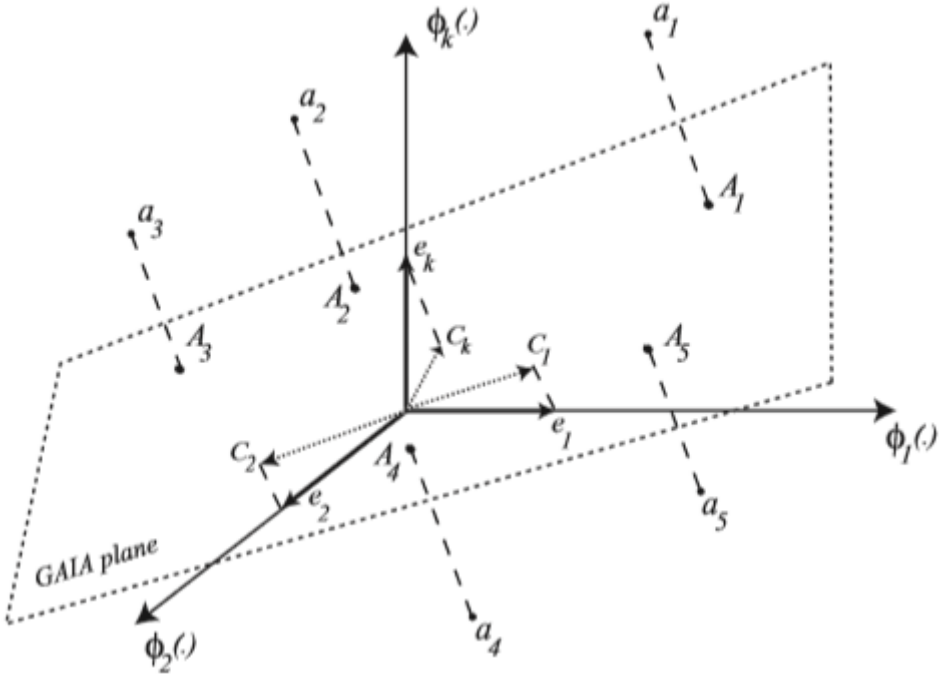
Quando $\phi(a) > 0$, a está superando todas as alternativas em todos os critérios, quando $\phi(a) < 0$ a está sendo superado por todas as alternativas em todos os critérios.

2.3.3.2.3 PROMETHEE GAIA

Supõem-se uma matriz $M = (n\ x\ k)$. A informação incluída na matriz M é mais extensa do que a da tabela de avaliação Tabela 15 - Tabela de Performance, por exemplo, porque os graus de preferência dados pelos critérios generalizados são levados em conta em M. Outro motivo disso é que, os $g_i(a_i)$ são expressos em sua própria escala, enquanto o $j_i(a_i)$ são adimensionais.

E, por M não depender dos pesos dos critérios, o conjunto de alternativas pode ser representado como uma nuvem de n pontos em um espaço de dimensão k. Porém, como o número de critérios é geralmente maior que dois, é impossível obter uma visão clara da posição relativa dos pontos em relação aos critérios. Portanto, é feita uma projeção das informações incluídas no espaço de dimensão k em um plano, juntamente com os vetores unitários dos eixos-coordenadas representando os critérios. Essa representação pode ser vista na Figura 26.

Figura 26 - Projeção no plano GAIA

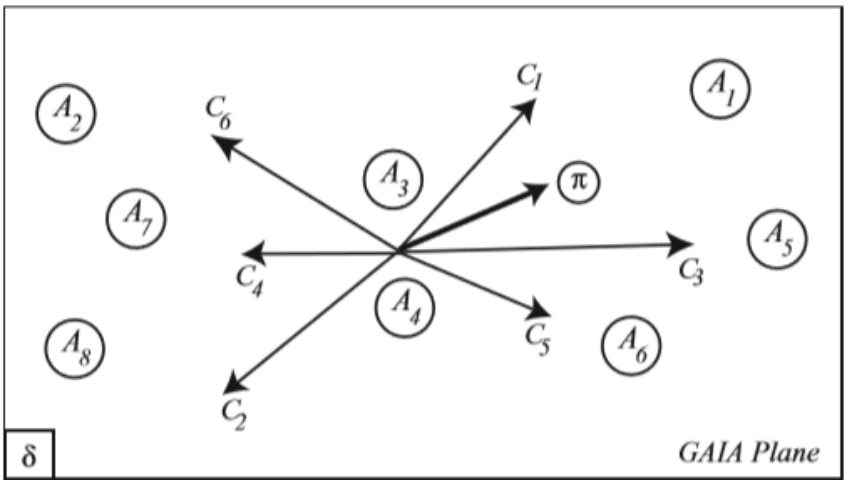


Fonte: (Brans & de Smet, 2016)

Além disso, existe o display gráfico das alternativas e dos critérios. Seja $(A_1, A_2, \ldots, A_i, \ldots, A_n)$ as projeções dos n pontos representando as alternativas e $(C_1, C_2, \ldots, C_i, \ldots, C_n)$ as projeções dos k vetores unitários dos eixos de coordenadas

do $\mathbb{R}^k$ representando os critérios. É possível gerar um plano GAIA conforme apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Plano GAIA



Fonte: (Brans & de Smet, 2016)

2.3.3.2.4 PROMETHEE VI FERRAMENTA SENSITIVA (Cérebro Humano)

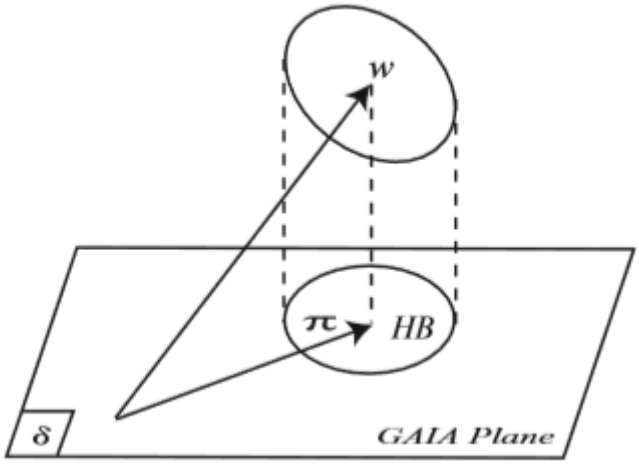
O módulo PROMETHEE VI fornece ao tomador de decisão informações adicionais sobre sua própria visão pessoal de seu problema multicritério. Essa extensão permite apreciar se o problema é *hard* (difícil) ou *soft* (suave/fácil) de acordo com sua opinião pessoal. É óbvio que a distribuição dos pesos desempenha um papel importante em todos os problemas multicritério. Assim que os pesos são fixados, uma classificação final é proposta pelo PROMETHEE II. Na maioria dos casos, o decisor hesita em atribuir valores imediatamente precisos dos pesos. Sua hesitação se deve a vários fatores, como a indeterminação, imprecisão, incerteza, falta de controle,... sobre a situação do mundo real. No entanto, o tomador de decisões geralmente tem em mente alguma ordem de grandeza nos pesos, de modo que, apesar de suas hesitações, ele é capaz de fornecer alguns intervalos, incluindo seus valores corretos. Deixe que esses intervalos sejam (Equação 39)

$$w_j^- \leq w_j \leq w_j^+, j = 1, \ldots, k. \tag{39}$$

Considera-se então o conjunto de todos os pontos extremos dos vetores unitários associados a todos os pesos permitidos. Este conjunto está limitando uma área na hiperesfera unitária em $\mathbb{R}^k$. Após isso, projeta-se essa área no plano GAIA. A

projeção resultando disso, é chama de ***H**uman **B**rain* (HB) ou Cérebro Humano, como demonstrado na Figura 28.

Figura 28 - Plano HB

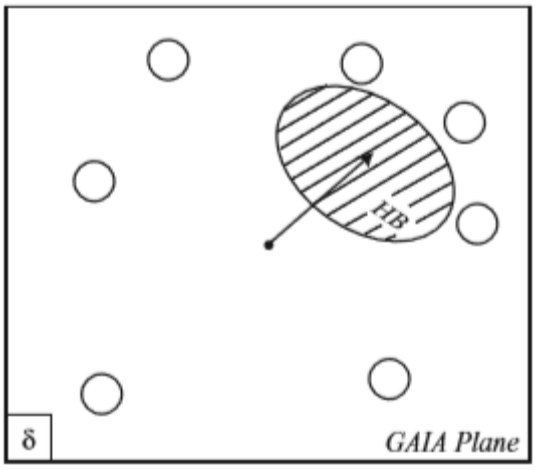


Fonte: (Brans & de Smet, 2016)

HB é a área que inclui todos os pontos extremos do eixo de decisão PROMETHEE (π), para todos os pesos permitidos. Duas situações particulares podem ocorrer:

S1: HB não inclui a origem do plano GAIA. Nesse caso, quando os pesos são modificados, o eixo de decisão (π) permanece orientado globalmente na mesma direção e todas as alternativas localizadas nessa direção são boas. O problema multicritério é fácil de resolver, é um problema *soft* (Figura 29).

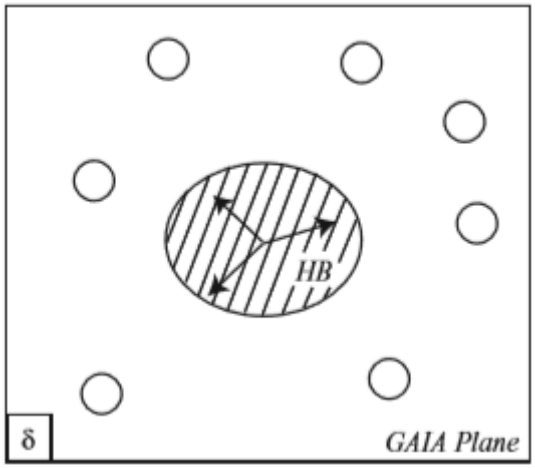
Figura 29 - Problema *Soft*



Fonte: (Brans & de Smet, 2016)

S2: inversamente, se, (HB) está incluindo a origem, o eixo de decisão (π) pode assumir qualquer orientação. Neste caso, soluções de compromisso podem ser obtidas em todas as direções. O que toma difícil tomar uma decisão final. De acordo com suas preferências e suas hesitações, o tomador de decisão está enfrentando um problema *hard* (Figura 30).

Figura 30 - Problema *Hard*



Fonte: (Brans & de Smet, 2016)

2.3.3.2.5 PROMETHEE V (MCDA sob restrições)

PROMETHEE I e II são apropriados para selecionar uma alternativa. No entanto, em algumas aplicações, um subconjunto de alternativas deve ser identificado, dado um conjunto de restrições.

Seja $\{a_i, i = 1,2,\dots,n\}$ o conjunto de alternativas possíveis, e que, a elas, associam-se as seguintes variáveis booleanas, como demonstrado na Equação (40):

$$\begin{cases} 1 & \text{se } a_i \text{ for selecionado,} \\ 0 & \text{se não.} \end{cases} \tag{40}$$

A extensão PROMETHEE V consiste nas duas etapas a seguir:

PASSO 1: o problema multicritério é considerado pela primeira vez sem restrições. O ranking PROMETHEE II é obtido para o qual os fluxos de rede $\{\phi(a_i), i = 1,2,\dots,n\}$ foram computados.

PASSO 2: o seguinte programa linear $\{0,1\}$ é então considerado para ter em conta as restrições adicionais (desde que possam ser expressas linearmente), como apresentado nas equações de (41) a (43).

$$\text{Função objetiva:} \qquad max\left\{\sum_{i=1}^{k} \phi(a_i)x_i\right\} \tag{41}$$

$$\text{Restrições:} \qquad \sum_{i=1}^{n} \lambda_{p,i}x_i \sim \beta_p \qquad p = 1, 2, \ldots, P \tag{42}$$

$$x_i \epsilon \{0, 1\} \qquad i = 1, 2, \ldots, n, \tag{43}$$

Onde $\sim$ é para $=, \geq \text{ ou } \leq$, e onde $\lambda_{p,i}$ são os coeficientes das restrições.

Os coeficientes da função objetiva são os fluxos líquidos de superação. Quanto maior o fluxo líquido, melhor a alternativa. A finalidade do programa linear $\{0,1\}$ é selecionar as alternativas que coletam o máximo possível de fluxo líquido e levar em conta as restrições.

As restrições podem incluir restrições de cardinalidade, orçamento, retorno, investimento, marketing, custo.... E podem estar relacionadas a todas as alternativas ou possivelmente a alguns *clusters*.

Depois de resolvido o programa linear $\{0,1\}$, é obtido um subconjunto de alternativas que satisfazem as restrições ao mesmo tempo em que proporcionam o máximo possível de fluxo líquido.

3 PROPOSTA CONCEITUAL DO MÉTODO DE APOIO A DECISÃO PARA A SELEÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS (CLÁSSICOS OU COLABORATIVOS) APLICADO A SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEL

Esse capítulo será destinado à proposta conceitual do método, considerando todos os pontos obtidos durante a revisão da literatura, como critérios e métodos que deem suporte à tomada de decisão.

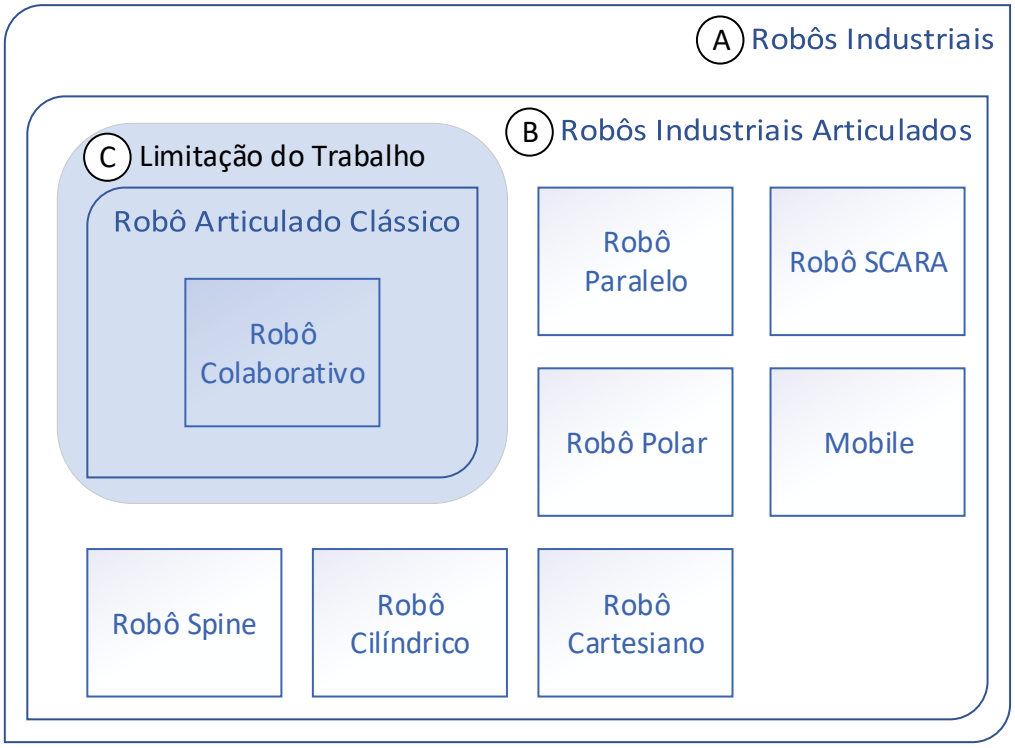
3.1 ESPAÇO PROBLEMA DA APLICAÇÃO ROBÔS

Como dito anteriormente por (Chatterjee, Athawale, & Chakraborty, 2010), (Rao, Patel, & Parnichkun, 2011). (Kahraman, Çevik, Ates, & Gülbay, 2007) a decisão de um robô para uma aplicação não é fácil. Muitas variáveis são envolvidas no processo decisório e os erros cometidos por um planejamento e implantação de um robô errado, são ainda mais caros. Com a chegada dos robôs colaborativos, novas atividades podem surgir, o que dificultará ainda mais um processo de escolha.

Com o intuito de facilitar a escolha, e fornecer dados aos tomadores de decisão na robótica industrial clássica e colaborativa, será proposto um método de apoio a decisão para a seleção de robôs industriais (clássicos ou colaborativos) aplicado a sistemas de manufatura flexível. O método, o qual será desenvolvida no item 3.2, utiliza a revisão da literatura sobre robôs, métodos e critérios e propõem um caminho no qual tomadores de decisão poderão se pautar para realizarem uma escolha mais assertiva.

Primeiramente é necessário definir o foco deste projeto, visto que a literatura sobre o tema de robôs, e as divisões feitas pela ISO em categorias são abrangentes. A figura abaixo, extensão da Figura 2, foi elaborada com o intuito de mostrar o âmbito no qual esse trabalho está inserido:

Figura 31 - Robôs Industriais



Fonte: (O Autor, 2020)

A ISO (ISO, 2011) divide os robôs em 3 categorias principais, robôs industriais, detalhe “A” da Figura 31, robôs de serviço e dispositivos robóticos. O trabalho tratará dos “Robôs Industriais”, detalhe “A”, mas não se abrangendo a todos os modelos, como no Detalhe “B”. Os robôs que serão tratados nessa metodologia são os robôs presentes no Detalhe “C”.

A decisão de trabalhar somente com os robôs industriais articulados clássicos e colaborativos se dá ao fato dos outros robôs presentes no detalhe “B” terem áreas de atividades muito diferentes, o que precisaria de uma nova revisão sobre cada um e modelos de decisão para cada um dos tipos de robôs não utilizados por esse projeto.

Além disso, o robô industrial articulado colaborativo, nada mais é que uma evolução dos robôs industriais articulados clássicos, visando a melhoria de pontos dos quais seu antepassado era falho, como dito por E. Colgate e Michael A. Peshkin (United States of America Patente Nº 5,952,796). Sua estrutura mecânica é similar, com pequenas mudanças, como, por exemplo, a preocupação de cantos vivos, presentes nos robôs colaborativos. Os fornecedores, e a classificação de acordo com a ISO 8373 são extremamente similares.

Nada impede que um projeto de suporte à tomada de decisão utilizando apenas os *COBOT*s fosse feito, mas esta proposta incluirá tanto os *COBOT*s quanto seus predecessores no processo de suporte a tomada de decisão.

A Tabela 16 foi feita com base no gráfico da Figura 18 com a intenção de mostrar de forma mais aprofundada os autores que utilizaram os principais métodos da revisão.

Tabela 16 - Autores nos métodos mais usados

Método	Autores
TOPSIS	(Parkan & Wu, 1999), (Chu & Lin, 2003), (Bhangale, Agrawal, & Saha, 2004), (Kahraman, Çevik, Ates, & Gülbay, 2007), (Özgürler, Güneri, Gülsün, & Yılmaz, 2011), (Chaghooshi, Fathi, & Kashef, 2012), (Tao, Chen, Liu, & Wang, 2012), (Vahdani, Tavakkoli-Moghaddam, Mousavi, & Ghodratnama, 2013), (Bairagi, Dey, Sarkar, & Sanyal, 2014), (Parameshwaran, Kumar, & Saravanakumar, 2015).
AHP	(Goh, 1997), (Kapoor & Tak, 2005), (Bhattacharya, Sarkar, & Mukherjee, 2005), (Özgürler, Güneri, Gülsün, & Yılmaz, 2011), (Tao, Chen, Liu, & Wang, 2012), (Iç, Yurdakul, & Dengiz, 2013), (Bairagi, Dey, Sarkar, & Sanyal, 2014).
PROMETHEE	(Martín Ramos, García, Gómez-Bravo, & Morón, 2010), (Chatterjee, Athawale, & Chakraborty, 2010), (Taillandier & Stinckwich, 2011), (Sen, Datta, Patel, & Mahapatra, 2015), (Sen, Datta, & Mahapatra, 2016).

Fonte: (O Autor, 2020)

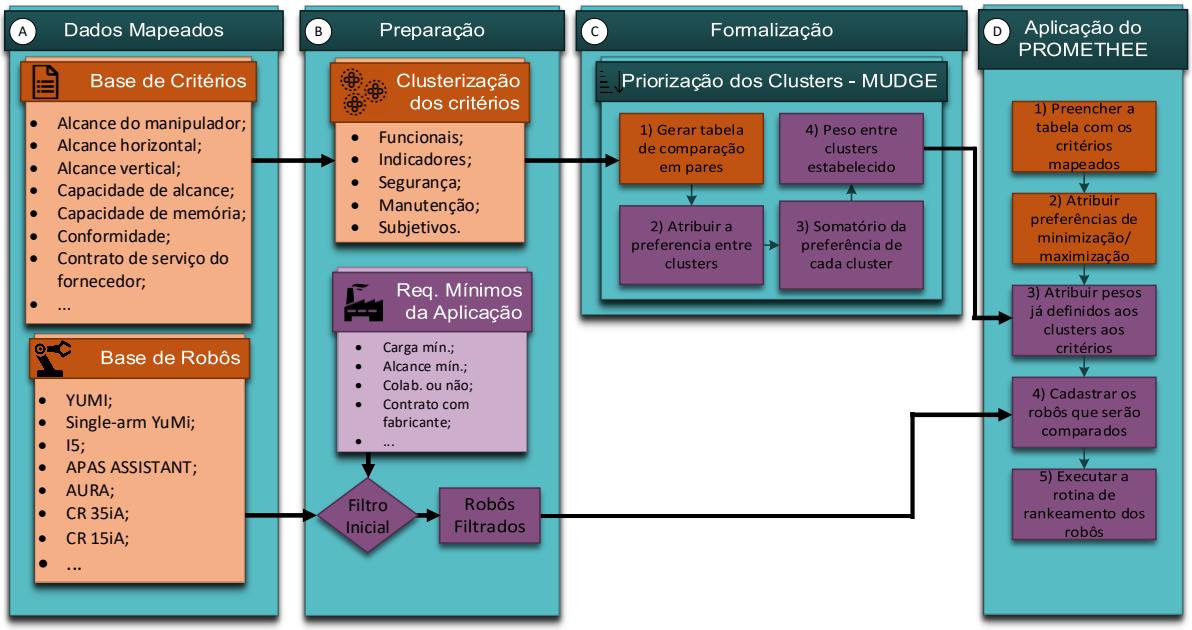
Dentro dos métodos estudados, AHP, TOPSIS, ELECTRE e PROMETHEE. A decisão final resultou na escolha do método PROMETHEE, pois além de ser um método dos mais utilizados pela literatura de escolhas em robôs, é um método que permite a análise de sensibilidade dos pesos, permite o rankeamento parcial e total dos robôs, e utilizando o PROMETHEE GAIA é possível posicionar os robôs em um plano gráfico frente aos critérios. Isso permite que depois de uma avaliação inicial, por parte do decisor, ele possa trabalhar os dados e ver a sua preferência agindo nos resultados. Além disso, fica fácil de o decisor mostrar os resultados e explicar a sua seleção para outros de forma gráfica.

O PROMETHEE, por meio do PROMETHEE II e extensões, permite também que sejam avaliadas todas as alternativas, por meio da ordenação e sobreposição delas, isso garante que, caso surjam problemas na hora da decisão final, ele possa recorrer ao ranking de alternativas sem grandes perdas de tempo.

3.2 ARQUITETURA CONCEITUAL DO MÉTODO DE APOIO A DECISÃO PARA A SELAÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS (CLÁSSICO OU COLABORATIVOS) APLICADO A SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEL

Com a definição do espaço problema e a seleção do método de suporte a decisão, propõem-se como deverá ser realizado o desenvolvimento do método de assistência a tomada de decisão para a seleção de robôs industriais articulados, colaborativos e clássicos. A Figura 32 apresenta a arquitetura conceitual do desenvolvimento do método de apoio a decisão para a seleção de robôs industriais (clássicos ou colaborativos) aplicado a sistemas de manufatura flexível. Este método considera os *inputs* necessários vindos da literatura, como critérios e robôs, e as etapas de desenvolvimento do método. Após isso, será demonstrado o output esperado.

Figura 32 - Modelo Conceitual do Método



Fonte: (O Autor, 2020)

Com a arquitetura apresentada na Figura 32, primeiramente é necessário explicar as cores do modelo. A cor laranja representa elementos que serão definidos preliminarmente pela pesquisa e estão disponíveis no método de apoio a decisão. Já a cor roxa, representa atividades que devem ser realizadas pelo tomador de decisão. Abaixo serão descritos em detalhes as funções de cada bloco do método, e as etapas envolvidas neles.

- O Bloco A da Figura 32 representa os dados mapeados pela revisão da literatura, especificamente os critérios e robôs mapeados. Esta parte informa ao tomador de decisão o que existe para que ele tenha uma noção ampla do que existe e do que é utilizado.
- O Bloco B, trata sobre a preparação dos dados mapeados. Nesta parte, o autor deverá separar cada critério em grupos/categorias. Essas categorias têm a intenção de facilitarem as etapas futuras de comparação e priorização. Exemplos de categorias de critérios que podem ser criadas: (i) Grupo de critérios funcionais; (ii) Grupo de critérios indicadores; (iii) Grupo para critérios de segurança; (iv) Grupo para critérios de manutenção; e (v) Grupo para critérios não-funcionais. Adicionalmente, o bloco B também necessita que tomador de decisão

faça um filtro inicial dos robôs. Isso deverá ser feito levando-se em conta os requisitos mínimos da aplicação desejada e retirando-se os robôs que não atingem o mínimo desejado da aplicação.

- O Bloco C, formalização, é a etapa onde serão atribuídas as preferências aos grupos. Ele é estruturado em 4 etapas: (i) A primeira etapa é parte de pesquisa e estará disponível ao tomador de decisão e nela deve ser criada a tabela de comparação em pares, que considerará os grupos que vão ser criados; (ii) A segunda etapa é a atribuição de peso aos grupos; (iii) a terceira etapa é o somatório da preferência de cada grupo e (iv) a quarta é a definição da prioridade de cada grupo. Todas essas etapas serão mais bem detalhadas no capítulo 4.
- O Bloco D, aplicação do PROMETHEE, é a parte onde serão desenvolvidos todos os cálculos para a assistência a tomada de decisão. As duas primeiras etapas desse bloco estarão definidas pelo autor, e são elas: (i) o preenchimento da tabela do PROMETHEE com os critérios mapeados e (ii) a atribuição de preferência de maximização ou minimização. As etapas 3 a 5 devem ser realizadas pelo tomador de decisão. (iii) A terceira etapa é o preenchimento da tabela do PROMETHEE com os pesos previamente definidos no bloco C; (iv) a etapa 4 é onde serão cadastrados todos os robôs previamente filtrados no bloco B, e (v) a etapa 5 é onde são realizados os cálculos do PROMETHEE e o rankeamento dos robôs.

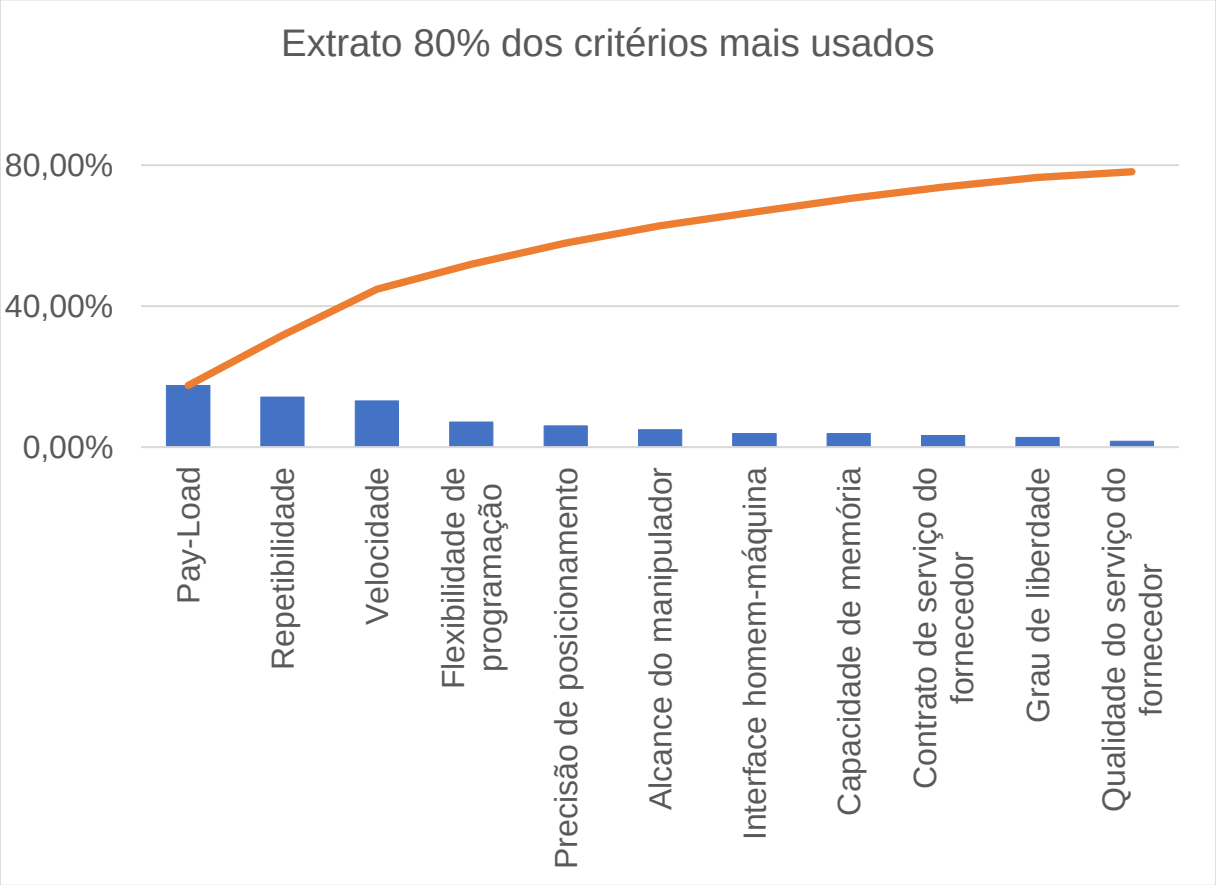
4 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE APOIO A DECISÃO PARA A SELEÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS (CLÁSSICOS OU COLABORATIVOS) APLICADO A SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEL

A partir daqui será explicado o caminho utilizado para o desenvolvimento do método de apoio. Serão levadas em conta todas as etapas descritas no capítulo 3, apresentando passo a passo como elas devem ser elaboradas.

4.1 BASE DE CRITÉRIOS

No item 2.2 foi realizado uma revisão literatura que possibilitou a identificação de critérios utilizados para a seleção de robôs. Como muitos critérios têm uma baixa utilização ou aderência uma curva ABC foi elaborada para identificar os critérios que gerassem maior impacto nas decisões. O Gráfico 1 é um extrato dessa curva que mostra apenas os critérios que juntos representam 80% das utilizações na literatura.

Gráfico 1 - Critérios mais usados



Fonte: (O Autor, 2020)

Com base no Gráfico 1, abaixo serão detalhados cada um dos critérios:

(i) ***Payload* –** Esse critério se refere à carga máxima que o robô consegue levantar no último eixo/atuador final;

(ii) **Repetibilidade –** É a capacidade do instrumento de repetir a mesma saída para um dado valor, quando a mesma entrada é aplicada inúmeras vezes;

(iii) **Velocidade –** Se refere a velocidade a qual o robô pode funcionar de forma normal, executando os ciclos de atividades;

(iv) **Flexibilidade de Programação –** Representa a facilidade de reprogramar o robô para uma nova aplicação, ou até mesmo à mesma aplicação de uma forma diferente;

(v) **Precisão de posicionamento –** É por meio deste critério que verificar-se se o robô está transmitindo ou indicando o que realmente está acontecendo no processo, ou seja, a precisão indica a diferença do valor medido em relação ao valor real;

(vi) **Alcance no manipulador –** Se refere à distância máxima que o manipulador ou atuador final consegue chegar;

(vii) **Interface Homem-Máquina –** É qualquer dispositivo que faça com que seja possível utilizar as máquinas por meio de uma interface. Uma boa Interface homem-máquina permite uma melhor acessibilidade e um melhor controle dos processos com um painel simplificado;

(viii) **Capacidade de Memória –** Se refere à capacidade de armazenar informações de modo que essas possam ser acessadas quando buscamos. Programações grandes, com muitos inputs necessitam de uma memória maior.

(ix) **Contrato de serviço com fornecedor –** É um contrato entre duas empresas, um cliente, por um lado, e um prestador de serviços, por outro. Este acordo geralmente busca criar uma fidelidade entre as duas partes, trazendo diversos benefícios;

(x) **Graus de liberdade –** O número de graus de liberdade que um manipular possui é o número de variáveis de posição independentes que

precisariam ser especificadas para localizar todas as partes do mecanismo;

(xi) **Qualidade de serviço do fornecedor –** Esse critério representa o quão vem os serviços são prestados por diferentes fornecedores. Fornecedores que fornecem serviços melhores, são priorizados.

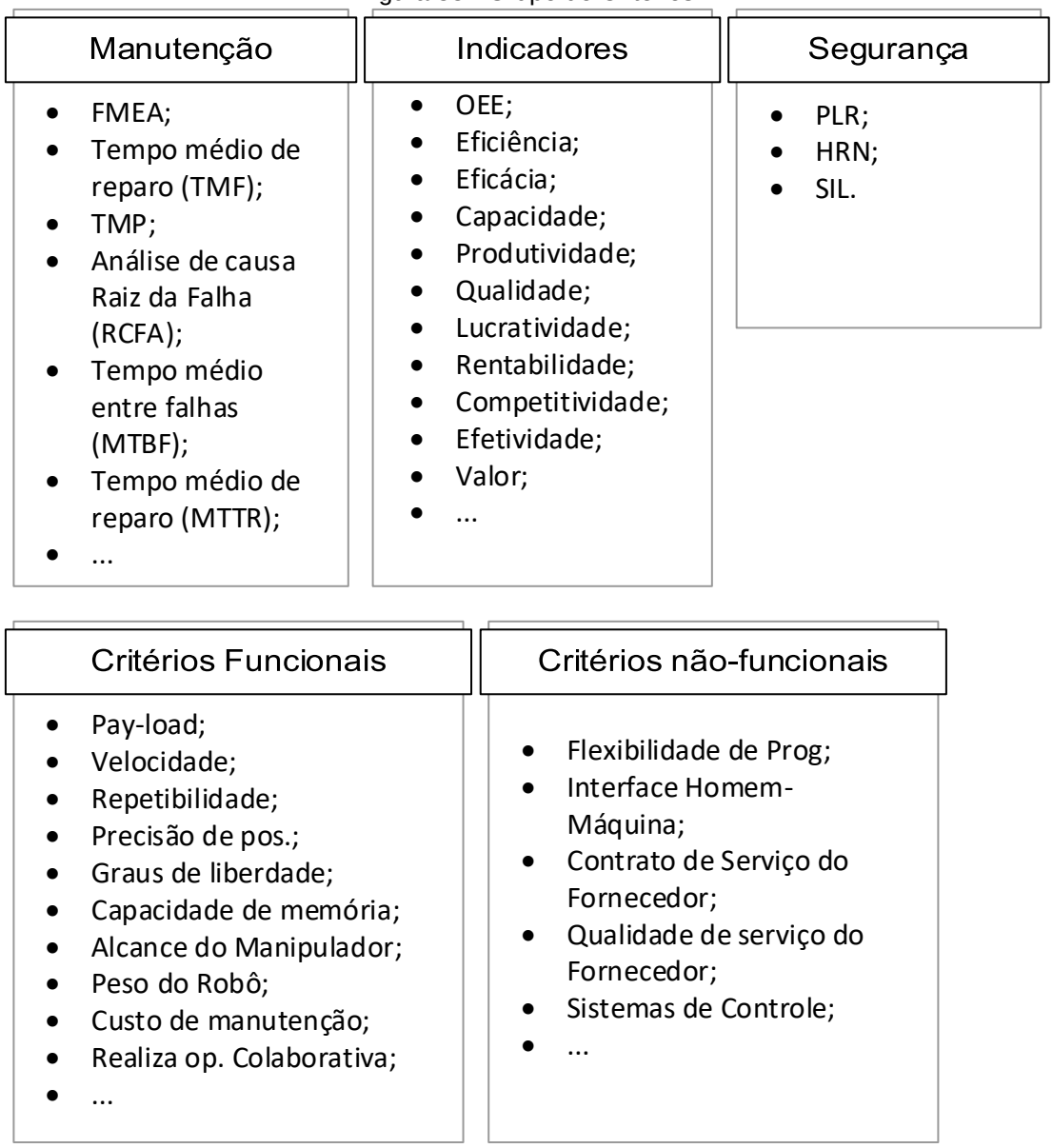
4.2 AGRUPAMENTO DOS CRITÉRIOS

Como dito anteriormente, o agrupamento dos critérios tem a intenção de facilitar etapas futuras de comparação e priorização. O agrupamento faz com que critérios similares estejam de uma forma agrupada, e então, um grupo fica responsável por todos os critérios dentro dele.

Caso o decisor decida por utilizar critérios que não estão presentes na literatura ou no presente trabalho, ele pode seguir o mesmo caminho na hora de agrupa-los, e um exemplo disso é a Figura 33. Esta figura demonstra um exemplo de agrupamento de critérios que não estão presentes na literatura, e que utilizam a premissa de correlação entre níveis de critérios nos métodos multicritério para a elaboração do grupo. Isso é: um critério de nível 1 (no caso do exemplo o nome do grupo: manutenção, indicadores, segurança, critérios funcionais e critérios não-funcionais) tem nele critérios níveis 2, que podem ser seguidos por critérios níveis 3 e assim por diante.

. Vale ressaltar que quanto menos grupos forem criados, mais fácil é de executar o método proposto. Caso sejam criados muitos grupos, o processo vai precisar de mais dados de entrada e mais informações.

Figura 33 - Grupo de Critérios



Fonte: (O Autor, 2020)

Abaixo serão apresentadas as principais informações de cada um dos grupos.

(i) **Grupo para critérios de manutenção**: este grupo apresenta as informações relevantes referentes a manutenção dos robôs que serão selecionados. Esse tipo de grupo é importante para todo decisor que se preocupa com as manutenções e possíveis falhas no funcionamento do robô. São critérios que não tem um impacto imediato na atividade realizada pelo robô, mas são critérios que em algum momento da aplicação aparecem. São exemplos de critérios presentes no grupo de

manutenção: análise de modo e efeito de falha (FMEA), tempo médio entre falhas, tempo médio operacional (TMO), análise de causa raiz (RCFA), período médio entre falhas (MTBF), tempo médio para reparo (MTTR), dentre outros;

(ii) **Grupo para critérios indicadores**: toda fábrica utiliza indicadores para verificar o desempenho de sua produção. Assim como o grupo anterior, esses critérios não apresentarão um impacto imediato, porém são critérios que sempre são utilizados quando se faz necessária a verificação do desempenho do robô em suas atividades. São exemplos de critérios presentes no grupo de indicadores: oEE, eficiência, eficácia, capacidade, produtividade, qualidade, dentre outros;

(iii) **Grupo para critérios de segurança**: a segurança é um dos fatores primordiais de qualquer ilha robotizada, inúmeras normas devem ser seguidas em uma instalação e vários indicadores devem ser considerados. Os robôs colaborativos já vêm com sensores e ferramentas de segurança intrínsecos ao seu funcionamento oriundas do fabricante. O decisor pode optar por robôs que sejam mais seguros que outros e alguns exemplos de critérios que podem ser utilizados são: *Performance Level required* (PLr), *Hazard Rating Number* (HRN) e *Safety Integrity Level* (SIL);

(iv) **Grupo para critérios funcionais**: os critérios deste grupo são critérios amplamente utilizados pela literatura e se referem às características físicas e funcionais dos robôs. São exemplos de critérios funcionais: Payload, velocidade, Repetibilidade, precisão de posicionamento, dentre outros;

(v) **Grupo para critérios não-funcionais**: esse grupo representa os critérios que não tem um valor fixo, alterando conforme a preferência do decisor. Esse tipo de critério é muito importante quando se pensa na experiência que o decisor quer ter com a compra do robô, ou seja: eu vou poder mudar esse robô de lugar depois? Ele é fácil de programar? O contrato com o determinado fornecedor é superior ao contrato com outro?

4.3 PRIORIZAÇÃO DOS GRUPOS

Antes do processo seletivo iniciar, é necessário que sejam atribuídos pesos para cada um dos grupos previamente definidos. Os pesos são a importância que um atributo tem no domínio estudado. Quanto maior for o peso de um critério, mais significante ele vai ser para o horizonte em que ele está sendo analizado. Esses pesos são obtidos por uma análise comparativa do desempenho de um grupo comparado ao outro por meio do método de MUDGE.

O método de MUGDE é uma análise numérica funcional de priorização de alternativas ou critérios pela ordem de importância que elas representam para o decisor. Em suma, o método auxilia na determinação dos critérios/alternativas mais importantes para o decisor. Para isso, o método realiza comparações em pares entre as alternativas e critérios, pelo grau de importância que um apresenta em relação ao outro (Csillag, 1995).

Para começar a atribuição de pesos, o tomador de decisão deve montar e preencher uma matriz comparativa entre os grupos, igual a Tabela 17. Caso seja desejada maior precisão na atribuição de pesos, outras tabelas poderão ser preenchidas por outros especialistas no assunto. A única etapa extra que deverá ser realizada, caso isso ocorra, é a soma da coluna “Total” de todos os especialistas ao final.

Tabela 17 - Método de MUDGE

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	Total:	Porcentual:
C_1					$\sum C_1$	$\frac{\sum C_1}{\sum C_1 + \sum C_2 + \sum C_3}$
	C_2				$\sum C_2$	$\frac{\sum C_2}{\sum C_1 + \sum C_2 + \sum C_3}$
		C_3			$\sum C_3$	$\frac{\sum C_3}{\sum C_1 + \sum C_2 + \sum C_3}$
			C_4		$\sum C_4$	$\frac{\sum C_4}{\sum C_1 + \sum C_2 + \sum C_3}$
				C_5	$\sum C_5$	$\frac{\sum C_5}{\sum C_1 + \sum C_2 + \sum C_3}$

Fonte: (O Autor, 2020)

- C_1 = Grupo para critérios de manutenção;
- C_2 = Grupo para critérios indicadores;
- C_3 = Grupo para critérios de segurança;
- C_4 = Grupo para critérios funcionais;
- C_5 = Grupo para critérios não-funcionais.

Com a matriz montada, comparam-se e preenchem-se as lacunas da matriz sempre com o questionamento: “Qual grupo/robô/fabricamente é mais importante/melhor, e quanto ele é mais importante”: (i) C_1, segunda linha, ou C_2, segunda coluna; (ii) C_1, segunda linha, ou C_3, terceira coluna; (iii) C_1, segunda linha, ou C_4, quarta coluna; (iv) C_1, segunda linha, ou C_5, quinta coluna; (v) C_2, terceira linha, ou C_3, terceira coluna; (vi) C_2, terceira linha, ou C_4, quarta coluna; (vii) C_2, terceira linha, ou C_5, quinta coluna; (viii) C_3, quarta linha, ou C_4, quarta coluna; (ix) C_3, quarta linha, ou C_5, quinta coluna; e (x) C_4, quinta linha, ou C_5, quinta coluna. Em cada uma dessas comparações, aquele grupo que for considerado como mais importante, deve ser preenchido na tabela junto a uma nota que varia de 1 a 5.

Essas notas representam o quão mais importante é um grupo em relação ao outro, onde:

Nota 5 – Muito mais importante

Nota 3 – Moderadamente mais importante

Nota 1 – Levemente mais importante

A coluna total representa o total de vezes que um grupo sobrepos o outro. Para essa coluna, soma-se todas a notas de importancia em toda a tabela do grupo avaliado, e escreve-se na linha desse grupo avalido. O porcentual será a relação entre a prioridade do grupo sobre todas as prioridades dadas.

Um exemplo de uma matriz completa será mostrada abaixo:

Tabela 18 - MUDGE Preenchido

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	Total:	Porcentual:
C_1	C_2 2	C_3 5	C_4 3	C_1 1	C_1= 1	3,125%
	C_2	C_3 5	C_2 1	C_2 2	C_2= 5	15,625%
		C_3	C_3 5	C_3 5	C_3= 20	62,5%
			C_4	C_4 3	C_4= 6	18,75%
				C_5	C_5= 0	0%

Fonte: (O Autor, 2020)

Com essa etapa realizada por todos os especialistas, devem ser somadas todas as colunas “total” de todos os especialistas, com o propósito de obter-se o desempenho final de cada grupo.

O mesmo procedimento pode ser realizado para a atribuição de valores a critérios não-funcionais dos robôs ao em vez de pesos. Abaixo será elaborado um um processo de atribuição de valores a critérios não-funcionais.

Exemplo: 1) Qual melhor robô em um critério subjetivo como Contrato de Serviço com fornecedor?

R.: Para isso é montada a tabela, comparando cada robô, e, para cada etapa, pergunta-se: quem tem um contrato de serviço melhor? (i) R_1, segunda linha, ou R_2, segunda coluna? (ii) R_1, segunda linha, ou R_3, terceira coluna? (iii) R_1, segunda linha, ou R_n, enésima coluna? até que a tabela inteira esteja preenchida.

Tabela 19 - Atribuição de valores a critérios não-funcionais

R_1	R_2	R_3	...	R_n	Total:	Porcentual:
R_1					$\sum R_1$	$\frac{\sum R_1}{\sum R_1 + \sum R_2 + \sum R_3 + \cdots + \sum R_n}$
	R_2				$\sum R_2$	$\frac{\sum R_2}{\sum R_1 + \sum R_2 + \sum R_3 + \cdots + \sum R_n}$
		R_3			$\sum R_3$	$\frac{\sum R_3}{\sum R_1 + \sum R_2 + \sum R_3 + \cdots + \sum R_n}$
			...		..	...
				R_n	$\sum R_n$	$\frac{\sum R_n}{\sum R_1 + \sum R_2 + \sum R_3 + \cdots + \sum R_n}$

Fonte: (O Autor, 2020)

Assim como nos grupos, o valor final de um critério subjetivo será tado pelo somatório de todas as colunas “Total”.

4.4 BASE DE ROBOS

Para a elaboração da base de robôs existentes foi mapeado e extraído as características de robôs dos fabricantes, ABB, Aubo, Bosch, Comau, FANUC, F&P Personal Robotics, Franka, Kawada Industries, Kuka, Life Robotics, Mabi, Yaskawa, Mrk System, Precise Automation, Rethink Robotics, Staubli e Universal Robots. Com esses dados foi criada uma tabela de classificação no Excel com os elementos do Quadro 8:

Quadro 8 - Tabela classificação da base de Robos

1)	Nome do Fabricante	2)	Modelo do robô
3)	Graus de liberdade	*4)*	*Payload*
5)	Peso	6)	Repetibilidade
7)	Alcance	8)	Velocidade de Ciclo
9)	Velocidade Rotação Eixo 1	10)	Velocidade Rotação Eixo 2
11)	Velocidade Rotação Eixo 3	12)	Velocidade Rotação Eixo 4
13)	Velocidade Rotação Eixo 5	14)	Velocidade Rotação Eixo 6
15)	Velocidade Rotação Eixo 7	16)	Facilidade de Programação

17) Segurança	18) Colaborativo?

Fonte: (O Autor, 2020)

Esses elementos são fundamentais para a seleção de robôs, como foi possível ver nos critérios mais utilizados na base de critérios. O Quadro 8 apresenta um recorte da tabela, a qual pode ser visualizada na integra no apêndice A.

Vale ressaltar que quaisquer robôs que não estão presentes nessa base podem ser adicionados sem qualquer problema, e podem ser utilizados no processo decisório.

4.5 REQUISITOS MÍNIMOS DA APLICAÇÃO

Com base no item requisitos mínimos da aplicação, da Figura 32, os tópicos abaixo foram elaborados. O intuito desses tópicos é demonstrar de forma sucinta alguns dos requisitos e critérios mínimos que uma determinada aplicação pode ter. Com isso, espera-se que o decisor tenha uma forma de guia sistematizado para exclusão de robôs inadequados para a aplicação.

- ***Payload***: qual a carga mínima que a aplicação pede? Foi considerado que quanto mais longe a carga está, menos o robô suporta? O *Payload* do robô é calculado em uma distância menor que o alcance máximo;
- **Velocidade:** qual a velocidade mínima que o robô pode se locomover para realizar a atividade necessária? Qual o tempo de ciclo necessário para a aplicação?
- **Precisão de posicionamento**: qual a precisão que o robô deve ter? São peças que requerem uma precisão milimétrica? As peças podem ter um erro de posicionamento?
- **Capacidade de memória**: o robô precisa ter uma memória grande para a aplicação desejada? A programação será realizada toda dentro dele ou um CLP mandará os comandos?
- **Contrato de Serviço do Fornecedor**: existe algum contrato com fornecedor que impeça a compra de robôs de outros fabricantes?
- **Grau de liberdade**: o robô precisa de no mínimo quantos graus de liberdade para realizar a operação?

- **Alcance do manipulador**: qual alcance mínimo que o robô deve ter para realizar a operação? Esse alcance pode ser alcance vertical ou alcance horizontal;
- **Material do robô**: o material que é feito o robô gera algum problema para a aplicação? Alguns robôs colaborativos são emborrachados.
- **Fonte de energia**: qual a alimentação da fábrica? É possível energizar o robô?
- **Facilidade de programação**: existem especialistas para programar esse robô? É necessária uma empresa terceira ou o robô será programado internamente?
- **Peso do robô**: o peso do robô pode impactar no transporte, na movimentação e no espaço em que será instalado. O local consegue fornecer sustentação ao robô e aos movimentos que serão realizados?
- **Tamanho do robô**: existe uma limitação de tamanho no local em que será instalado o robô?
- **Ação Colaborativa**: o robô irá funcionar de forma colaborativa? Serão realizados treinamentos aos colaboradores que irão trabalhar com esse robô? Será sinalizada a área?

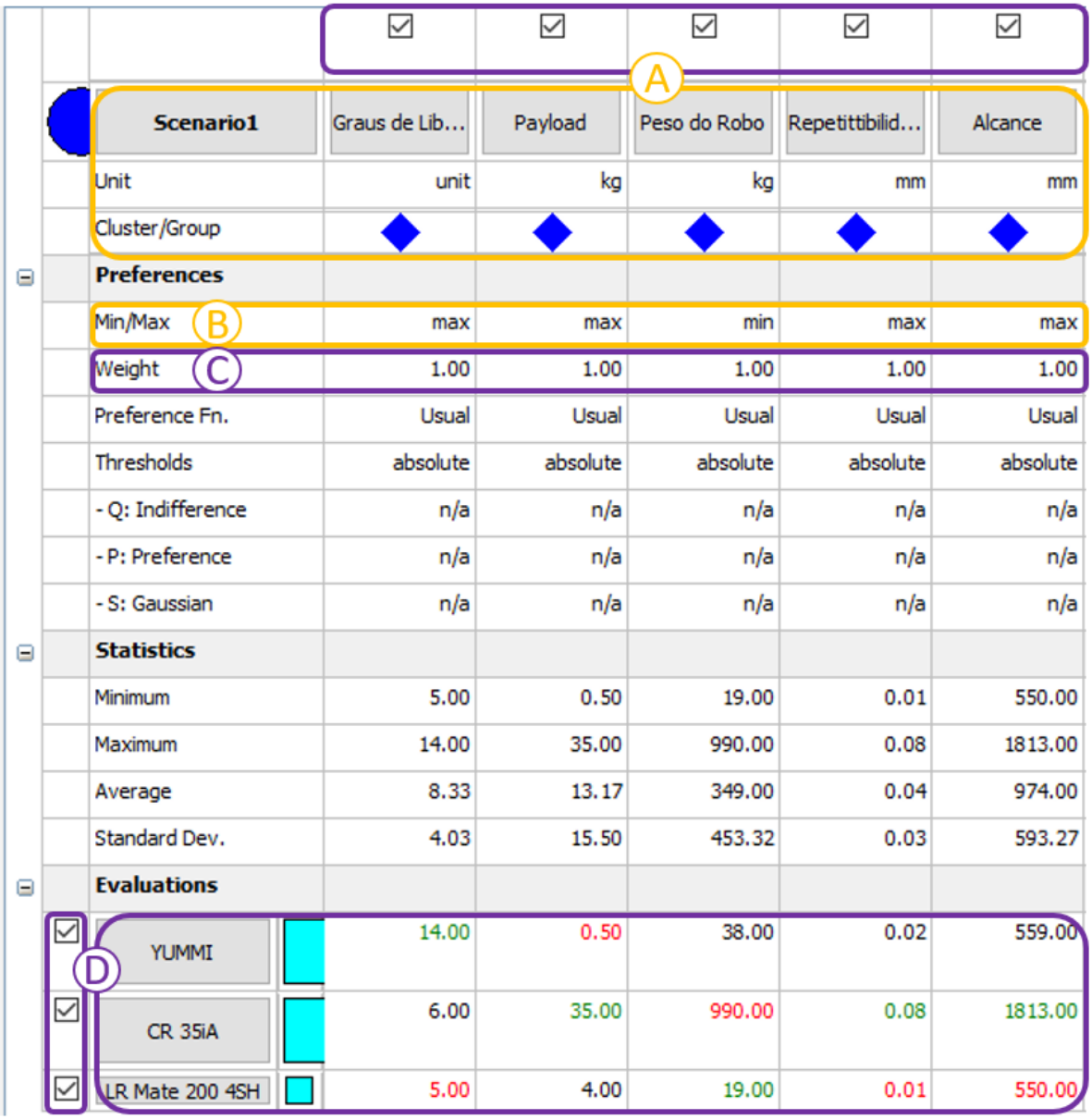
4.6 APLICAÇÃO DO PROMETHEE

Para simplificar a parte de cálculos do método PROMETHEE, é possível baixar de forma gratuita a ferramenta *Visual* PROMETHEE *Academic*, no site do fornecedor[2]. A ideia de utilizar um software para a parte de cálculos é aumentar a velocidade da entrada de dados e melhorar a parte gráfica presente no método. A Figura 34 representa a criação da tabela de decisão e em seguida serão explicados os campos que devem ser preenchidos.

---

[2] http://www.promethee-gaia.net/

Figura 34 - Extrato da tabela de decisão



Scenario1	Graus de Lib...	Payload	Peso do Robo	Repetittibilid...	Alcance
Unit	unit	kg	kg	mm	mm
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences					
Min/Max	max	max	min	max	max
Weight	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics					
Minimum	5.00	0.50	19.00	0.01	550.00
Maximum	14.00	35.00	990.00	0.08	1813.00
Average	8.33	13.17	349.00	0.04	974.00
Standard Dev.	4.03	15.50	453.32	0.03	593.27
Evaluations					
YUMMI	14.00	0.50	38.00	0.02	559.00
CR 35iA	6.00	35.00	990.00	0.08	1813.00
LR Mate 200 4SH	5.00	4.00	19.00	0.01	550.00

Fonte: (O Autor, 2020)

A Figura 34 possui as mesmas cores propostas no item 3.2; cor laranja para elementos que serão definidos preliminarmente pela pesquisa e cor roxa, para atividades que devem ser realizadas pelo tomador de decisão.

O detalhe A possui duas corres, isso ocorre, pois, a cor laranja é a parte onde o preenchimento da tabela do PROMETHEE com os critérios mapeados ocorre e onde são preenchidos a quais grupos eles pertencem e a parte roxa é a parte onde o decisor decide os critérios que serão utilizados; critérios que são utilizados mantem o *checkbox* marcado, critérios que não serão utilizados tem o *checkbox* desmarcado.

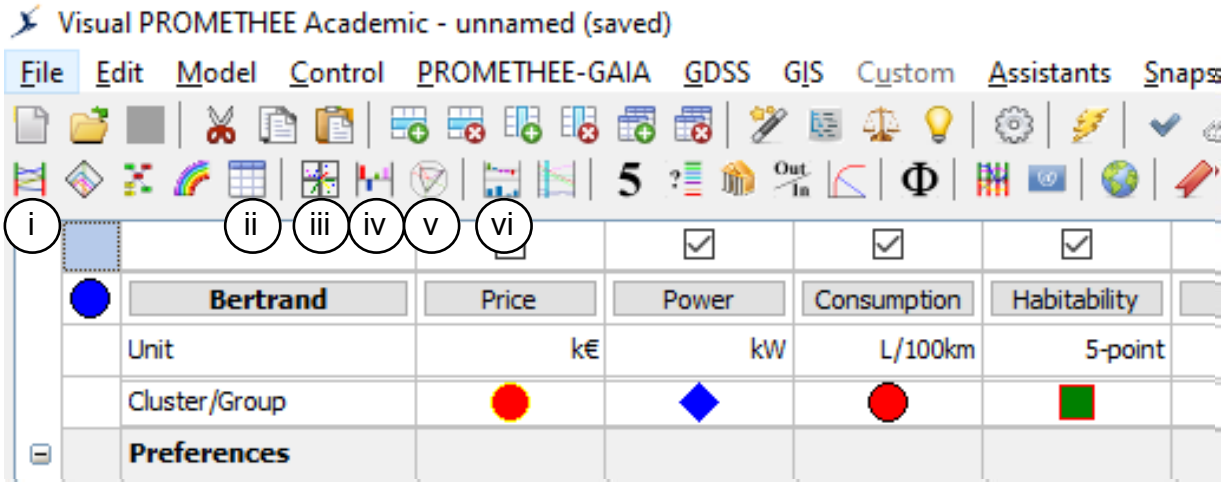
O detalhe B representa a atribuição de preferência de maximização ou minimização. Critérios benéficos tem uma preferência pelo maior possível, critérios não benéficos tem uma preferência pelo menor valor possível. Na figura é possível ver que os critérios graus de liberdade, *payload*, repetibilidade e alcance são critérios onde quanto maior o valor, melhor, ou seja, preferência de maximização. Já o critério peso do robô, é um critério não benéfico, ou seja, quanto menor for seu valor, melhor será.

O detalhe C deve ser preenchido com o resultado do bloco C, formalização. Nessa parte, é necessário verificar a qual grupo cada critério pertence, e o peso dado ao critério será o peso definido previamente ao grupo no item 4.3.

O detalhe D é onde ficam todas as alternativas que o decisor quer comparar. Primeiramente devem ser preenchidos os nomes das alternativas, como, por exemplo os robôs: YUMMI, CR 35iA e LR Mate 200 4SH, e após isso devem ser atribuídos na linha de cada robô, os valores dados no apêndice A desde documento.

O passo final é a realização do rankeamento completo das alternativas. O Visual PROMETHEE contempla todas as extensões estudadas anteriormente nesse trabalho com a demonstração gráfica. A Figura 35 apresenta onde ficam as opções de estudos, e abaixo dela os estudos serão explicados.

Figura 35 - Aba de estudos Visual PROMETHEE



Fonte: (O Autor, 2020)

(i) **PROMETHEE *Rankings*: r**ealiza o rankeamento total e parcial das alternativas por meio de uma sobreposição no gráfico. É responsável pelos cálculos e representação do PROMETHEE I e PROMETHEE II.

Esta análise é importante, pois demonstra quais robôs estão mais próximos de uma nota perfeita, isto é, uma nota igual a “1”;

(ii) **PROMETHEE *Table*: r**ealiza o rankeamento total das alternativas por meio dos fluxos de entrada e saída. Ele é importante, pois realiza o rankeamento total das alternativas, mostrando o desempenho final (*Phi*) do robô nas comparações;

(iii) **PROMETHEE Gaia:** demonstra de forma gráfica onde estão posicionadas as alternativas em comparação aos critérios. Essa forma de análise permite que, sem tratar de valores, o decisor veja onde as alternativas e critérios estão, assim como uma visualização de correlação negativa ou positiva entre os critérios;

(iv) ***Action Profiles*:** demonstra o desempenho de cada uma das alternativas em cada um dos critérios em comparação ao desempenho de alternativas nos mesmos critérios. Quanto melhor uma alternativa for em comparação a outra, mais a barra naquele critério de comparação irá aumentar. Essa análise é importante para uma verificação mais aprofundada do desempenho das alternativas em relação aos critérios;

(v) **GAIA *Webs***: Serve para verificar o gráfico teia de cada uma das alternativas. Diferente do anterior, essa forma de análise mostra única e exclusivamente o desempenho da alternativa em cada critério;

(vi) ***Walking Weigths*:** Serve para verificar os desempenhos das alternativas nos critérios caso o peso dado ao critério mude. Essa forma de análise não requer que os pesos sejam reescritos, basta deslizar com a barrinha para atribuir um novo peso e o gráfico irá responder automaticamente.

5 CASOS DE APLICAÇÃO

Esse capítulo trata o processo de busca dos atributos físicos dos robôs, e como resultado irá fornecer uma tabela com o compilado de informações obtidas.

5.1 CASO EXPERIMENTAL I – ESCOLHA DE ROBÔ PARA LABORATÓRIO DE INOVAÇÃO

O laboratório em questão é o centro de inovações em uma empresa do ramo automobilístico localizada em São José dos Pinhais, Paraná. A ideia da compra de um robô parte de uma das premissas da existência desse laboratório: ensinar e formar colaboradores em novas tecnologias sem necessidade de cursos externos, e incentivá-los a usá-las na empresa.

Essa premissa, somada ao crescente número de robôs no mercado, onde estimativas dizem que até 2021 existirão mais de 3,5 milhões de robôs instalados mundialmente, fazem com que essa seja uma das tecnologias principais para que laboratório tenha, estude e forme colaboradores; ainda mais considerando os emergentes robôs industriais colaborativos, que segundo (Forbes, 2018), representam atualmente 3% de todas as vendas, mas tendem a chegar em 34% até 2025.

Sendo assim, a ideia é comprar um robô para o laboratório, de forma a ensinar os colaboradores a utilizarem essa tecnologia; proporcionando mais conhecimento na empresa, e em paralelo, com o conhecimento da tecnologia e de suas aplicações, mais oportunidades e demandas por projetos surjam.

5.1.1 Requisitos mínimos da Aplicação

Nesse capítulo serão respondidas as perguntas elaboradas pelo trabalho para a detecção dos requisitos mínimos da aplicação e a filtragem inicial dos robôs que não são adequados para a aplicação desejada.

- ***Payload***: qual a carga mínima que a aplicação pede? Foi considerado que quanto mais longe a carga está, menos o robô suporta? O *Payload* do robô é calculado em uma distância menor que o alcance máximo;

  R.: Não existe um Payload mínimo para a aplicação a ser realizada. Contudo, espera-se que seja um payload suficientemente alto para que

diversas atividades dentro do laboratório sejam realizadas. É possível dizer que quanto maior o Payload suportado, melhor.

- **Velocidade: q**ual a velocidade mínima que o robô pode se locomover para realizar a atividade necessária? Qual o tempo de ciclo necessário para a aplicação?
  R.: Não existe uma velocidade mínima para a aplicação, o robô poderá ser utilizado em diversas tarefas que não requerem velocidade. Além disso, o robô estará dentro de um laboratório, sendo assim sua velocidade será limitada.

- **Precisão de posicionamento**: qual a precisão que o robô deve ter? São peças que requerem uma precisão milimétrica? As peças podem ter um erro de posicionamento?
  R.: Não existe uma precisão de posicionamento necessária para a aplicação.

- **Capacidade de memória**: o robô precisa ter uma memória grande para a aplicação desejada? A programação será realizada toda dentro dele ou um CLP mandará os comandos?
  R.: Não é necessária grande capacidade de memória. Os colaboradores que desejarem manter seus trabalhos salvos deverão salva-los em pendrives ou dispositivos externos.

- **Contrato de Serviço do Fornecedor**: existe algum contrato com fornecedor que impeça a compra de robôs de outros fabricantes?
  R.: Sim. A empresa tem contrato com diversos fornecedores, porém no momento priorizam-se robôs da FANUC nos robôs industriais clássicos. Nos robôs colaborativos, só podem ser comprados robôs homologados pela França, que são dos fabricantes: FANUC, KUKA, Universal Robots e ABB.

- **Grau de liberdade**: o robô precisa de no mínimo quantos graus de liberdade para realizar a operação?
  R.: Não existe um mínimo de graus de liberdade, mas o ideal é que quanto mais graus de liberdade, melhor, pois o robô vai poder ser utilizado em mais flexibilidade para execução de diferentes tarefas.

- **Alcance do manipulador**: qual alcance mínimo que o robô deve ter para realizar a operação? Esse alcance pode ser alcance vertical ou alcance horizontal;
  R.: Não existe um alcance mínimo para o robô, mas quanto maior (nos limites de altura da sala) melhor.

- **Material do robô**: o material que é feito o robô gera algum problema para a aplicação? Alguns robôs colaborativos são emborrachados.
  R.: Não.

- **Fonte de energia**: qual a alimentação da fábrica? É possível energizar o robô?
  R.: A fábrica tem pontos de 220v e 380v.

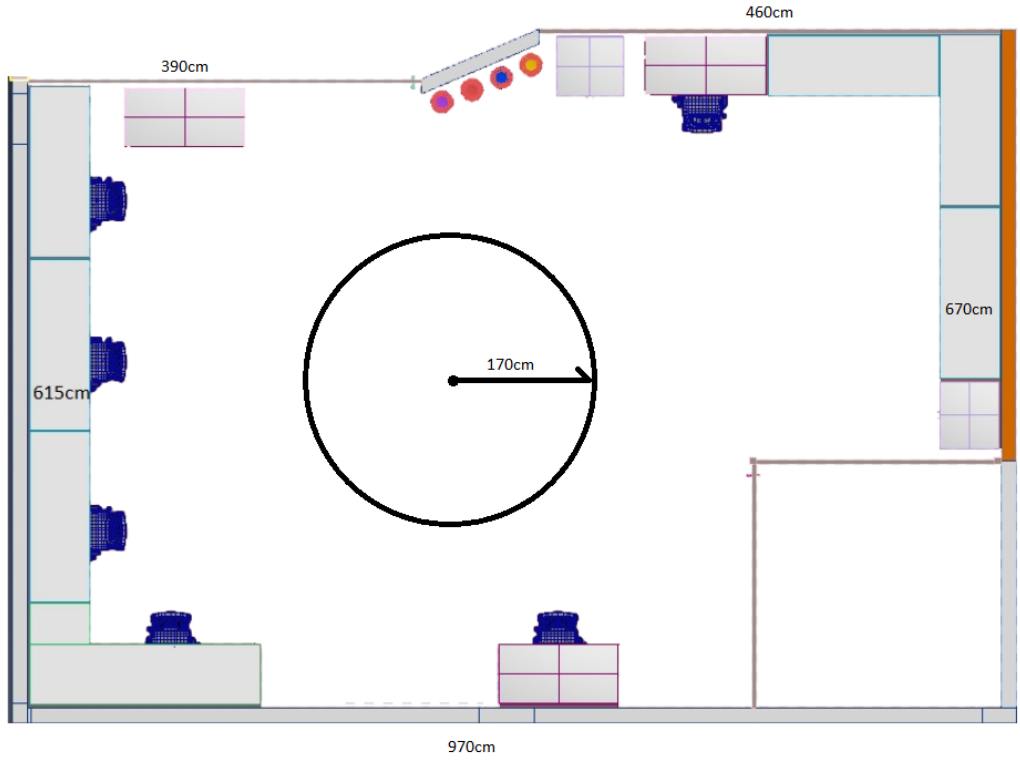
- **Facilidade de programação**: existem especialistas para programar esse robô? É necessária uma empresa terceira ou o robô será programado internamente?
  R.: Não existem especialistas no laboratório. Será necessário realizar um treinamento para aprender a utilizar, e, além disso, a programação deverá ser simples ao ponto de ser possível explicar para pessoas sem qualquer grau de conhecimento de robôs. Será programado internamente.

- **Peso do robô**: o peso do robô pode impactar no transporte, na movimentação e no espaço em que será instalado. O local consegue fornecer sustentação ao robô e aos movimentos que serão realizados?
  R.: Não existe um peso máximo calculado no momento, mas priorizam-se robôs com peso menor possível.

- **Tamanho do robô**: existe uma limitação de tamanho no local em que será instalado o robô?

  R.: Sim. O laboratório tem as seguintes dimensões da Figura 36. Sem considerar os dispositivos já instalados no laboratório. Espera-se que o robô tenha em torno de 170cm de alcance e no máximo 200cm de altura.

Figura 36 – Dimensões do Laboratório



Fonte: (O Autor, 2020)

- **Ação Colaborativa**: o robô irá funcionar de forma colaborativa? Serão realizados treinamentos aos colaboradores que irão trabalhar com esse robô? Será sinalizada a área?

  R.: Sim. O robô a ser utilizado deverá ser colaborativo pois não existe espaço físico no laboratório para a implantação de um robô clássico. Além disso, o robô poderá ser utilizado em várias funções na fabrica para testes, precisando ser flexivel.

Com base nas respostas dadas, foi gerado um compilado de forma a facilitar o capítulo seguinte, filtragem inicial dos robôs. O resultado disso é o Quadro 9.

Quadro 9 - Resumo Requisitos mínimos da aplicação Caso Experimental 1

Pergunta realizada sobre:	Resposta
Payload	Não é um fator limitante para a aplicação
Velocidade	Não é um fator limitante para a aplicação
Precisão de posicionamento	Não é um fator limitante para a aplicação
Capacidade de memória	Não é um fator limitante para a aplicação
Contrato de Serviço do Fornecedor	**Somente robôs FANUC, KUKA, Universal Robots e ABB**
Grau de liberdade	Não são um fator limitante para a aplicação
Alcance do manipulador	Não é um fator limitante para a aplicação
Material do robô	Não é um fator limitante para a aplicação
Fonte de energia	**Somente robôs com alimentação 220v ou 380v**
Facilidade de programação	Não é um fator limitante para a aplicação
Peso do robô	Não é um fator limitante para a aplicação
Tamanho do robô	**Somente robôs com no máximo 170cm de alcance e 200cm de altura**
Ação Colaborativa	**Somente robôs colaborativos**

Fonte: (O Autor, 2020)

5.1.2 Filtragem inicial dos Robôs

Nesse momento é realizada a filtragem inicial dos robôs. Para isso utilizam-se as respostas sobre os requisitos mínimos da aplicação como forma de filtro para o apêndice A.

Foram mantidos, e permaneceram na tabela após a aplicação do filtro:

(i) Robôs que fossem de fornecedores homologados pela empresa: FANUC, KUKA, Universal Robots e ABB;

(ii) Robôs que tenham menos de 170cm de alcance e de no máximo 200cm de altura;

(iii) Robôs que desempenhassem atividades colaborativas.

Após isso, e, considerando que todos os robôs restantes preenchem os requisitos mínimos, a tabela filtrada foi detalhada no apêndice B.

5.1.3 Escolha dos critérios de decisão e aplicação do método de MUDGE

Para seleção do robô o decisor optou por utilizar alguns dos critérios com maior relevância na revisão da literatura, como: (i) *Payload*; (ii) Repetibilidade; (iii) Velocidade; (iv) Flexibilidade de Programação; (v) Interface Homem-Máquina; (vi) Graus de liberdade; e (vii) Alcance no manipulador e um critério adicional (viii)

Segurança, que poderá ser verificada com o PLr do robô. Por mais que sejam critérios presentes como mais relevantes na literatura alguns critérios não foram escolhidos, e os motivos são os seguintes: o critério capacidade de memória não será utilizado, pois não é relevante na aplicação desejada, cada colaborador cuidará do seu projeto; o contrato de serviço com fornecedor é um critério limitante no trabalho, robôs que não estão com contrato não podem ser utilizados; a qualidade de serviço do fornecedor, não será utilizado, pois parte-se da ideia de que se já existem contratos com os fornecedores, eles tem bons serviços; e por último a precisão de posicionamento não será utilizada pois não existe essa necessidade na aplicação.

Esses critérios ficam estruturados nos seguintes grupos:

(i) **Grupo para critérios de segurança**: (ix) Segurança ou PLr do robô;

(ii) **Grupo para critérios funcionais**: (i) *Payload;* (ii) Repetibilidade; (iii) Velocidade; (vi) Graus de liberdade; e (vii) Alcance no manipulador;

(iii) **Grupo para critérios não-funcionais**: (iv) Flexibilidade de Programação; (v) Interface Homem-Máquina.

Com os critérios definidos e divididos em grupos, vem a parte da atribuição de preferências utilizando-se a tabela de MUDGE (cap 4.2). Para que existisse maior acuracidade e confiabilidade nos pesos, foi solicitado que 4 especialistas preenchessem cada um, uma tabela. Algumas informações sobre eles:

1. Engenheiro Eletricista graduado pela universidade Federal do Paraná, com especialização em automação industrial pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná e habilitado como *Safety technician* pela *TÜV Rheinland*. Possui 10 anos de experiência na indústria automotiva nos setores de manutenção e automação industrial.
2. Engenheiro de Controle e Automação graduado pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná e habilitado como *Safety technician* pela *TÜV Rheinland*. Possui om 6 anos de experiência na indústria automotiva nos setores de performance e automação industrial.
3. Tecnólogo em Mecatrônica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, especialista em Capacitação em Energia Renovável e habilitado como *Safety*

technician pela *TÜV Rheinland*. Possui 12 anos de experiência com desenvolvimento de projetos e automação industrial.

4. Engenheiro Eletricista com ênfase em Telecomunicações graduado pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Possui 25 anos de experiência em setores de automação industrial.

A primeira tabela elaborada foi a tabela de priorização de grupos, Tabela 20. O intuito dessa tabela é verificar quais grupos são mais importantes para os especialistas.

Tabela 20 - Priorização dos Grupos Caso Experimental 1

C_1	C_2	C_3	Total:	Porcentual:
C_1			$\sum C_1$	$\frac{\sum C_1}{\sum C_1 + \sum C_2 + \sum C_3}$
	C_2		$\sum C_2$	$\frac{\sum C_2}{\sum C_1 + \sum C_2 + \sum C_3}$
		C_3	$\sum C_3$	$\frac{\sum C_3}{\sum C_1 + \sum C_2 + \sum C_3}$

Fonte: (O Autor, 2020)

- C_1 = Grupo de segurança;
- C_2 = Grupo para critérios funcionais;
- C_3 = Grupo para critérios não-funcionais.

Após cada especialista ter preenchido sua tabela, somou-se a coluna “Total” e calculou-se a coluna “Porcentual”, obtendo como resultado a Tabela 21.

Tabela 21 - Priorização dos Grupos Caso Experimental 1: resultado

C_1	C_2	C_3	Total:	Porcentual:
C_1	$\sum$	$\sum$	17	60%
	C_2	$\sum$	8	29%
		C_3	3	11%

Fonte: (O Autor, 2020)

O resultado dessa tabela mostra que os gestores tem uma preferência maior por robôs que tenham desempenho maior no grupo de segurança gerando um grau de importância 60% nessa categoria. Após isso eles tem preferência por robôs que tenham desempenho maior no grupo de critérios funcionais com grau de importância 29% e por último, robôs com desempenho maior no grupo de critérios não-funcionais com grau de importância 11%.

A segunda tabela elaborada foi a de comparação par a par dos robôs no critério (iv) Flexibilidade de programação, Tabela 22. O intuito dessa tabela foi dar valores ao critério (iv) Flexibilidade de programação, critério subjetivo em um primeiro momento e sem um valor exato, que pode variar de processo decisório para processo decisório. Os valores presentes na coluna “total” de cada um dos fabricantes, irá representar todos os robôs desse mesmo fabricante.

Tabela 22 - Priorização do critério Flexibilidade de prog. Caso Experimental 1

F_1	F_2	F_3	F_4	Total:	Porcentual:
F_1				$\sum F_1$	$\frac{\sum F_1}{\sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4}$
	F_2			$\sum F_2$	$\frac{\sum F_2}{\sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4}$
		F_3		$\sum F_3$	$\frac{\sum F_3}{\sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4}$
			F_4	$\sum F_4$	$\frac{\sum F_4}{\sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4}$

Fonte: (O Autor, 2020)

- $F_1 =$ ABB (Os colaborativos ABB têm programação igual aos convencionais ABB);
- $F_2 =$ FANUC (Os colaborativos FANUC têm programação igual aos convencionais FANUC);
- $F_3 =$ KUKA (O colaborativo KUKA é em JAVA e bibliotecas específicas de robótica);
- $F_4 =$ Universal Robots.

Após cada especialista ter preenchido sua tabela, somou-se a coluna “Total” e calculou-se a coluna “Porcentual”, obtendo como resultado a Tabela 23

Tabela 23 - Priorização do critério Flexibilidade de prog. Caso Experimental 1: resultado

F_1	F_2	F_3	F_4	Total:	Porcentual:
F_1	$\sum$	$\sum$	$\sum$	8	16%
	F_2	$\sum$	$\sum$	4	8%
		F_3	$\sum$	13	25%
			F_4	26	51%

Fonte: (O Autor, 2020)

O resultado dessa tabela mostra que os gestores tem uma preferência maior pela flexibilidade dos robôs da Universal *Robots* com importância de 51%. Após isso eles tem preferência por robôs da KUKA com grau de importância 25%. Depois por robôs da ABB com grau de importancia de 16% e por último, robôs da FANUC com grau de importância de 8%.

A última tabela elaborada foi a de comparação par a par dos robôs no critério (v) Interface Homem-Máquina, Tabela 24Tabela 22. O intuito dessa tabela foi dar valores ao critério (v) Interface Homem-Máquina dos robôs, critério subjetivo em um primeiro momento e sem um valor exato, que pode variar de processo decisório para processo decisório. Os valores presentes na coluna “Total” de cada um dos fabricantes, irá representar todos os robôs desse fabricante.

Tabela 24 - Priorização do critério Interface Homem-Máquina Caso Experimental 1

F_1	F_2	F_3	F_4	Total:	Porcentual:
F_1				$\sum F_1$	$\frac{\sum F_1}{\sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4}$
	F_2			$\sum F_2$	$\frac{\sum F_2}{\sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4}$
		F_3		$\sum F_3$	$\frac{\sum F_3}{\sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4}$
			F_4	$\sum F_4$	$\frac{\sum F_4}{\sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4}$

Fonte: (O Autor, 2020)

- $F_1 =$ ABB;
- $F_2 =$ FANUC;

- F_3 = KUKA;
- F_4 = *Universal Robots*.

Após cada especialista ter preenchido sua tabela, somou-se a coluna “Total” e calculou-se a coluna “Porcentual”, obtendo como resultado a Tabela 25.

Tabela 25 - Priorização do critério Interface Homem-Máquina. Caso Experimental 1: resultado

F_1	F_2	F_3	F_4	Total:	Porcentual:
F_1	∑	∑	∑	4	9%
	F_2	∑	∑	2	4%
		F_3	∑	7	15%
			F_4	33	72%

Fonte: (O Autor, 2020)

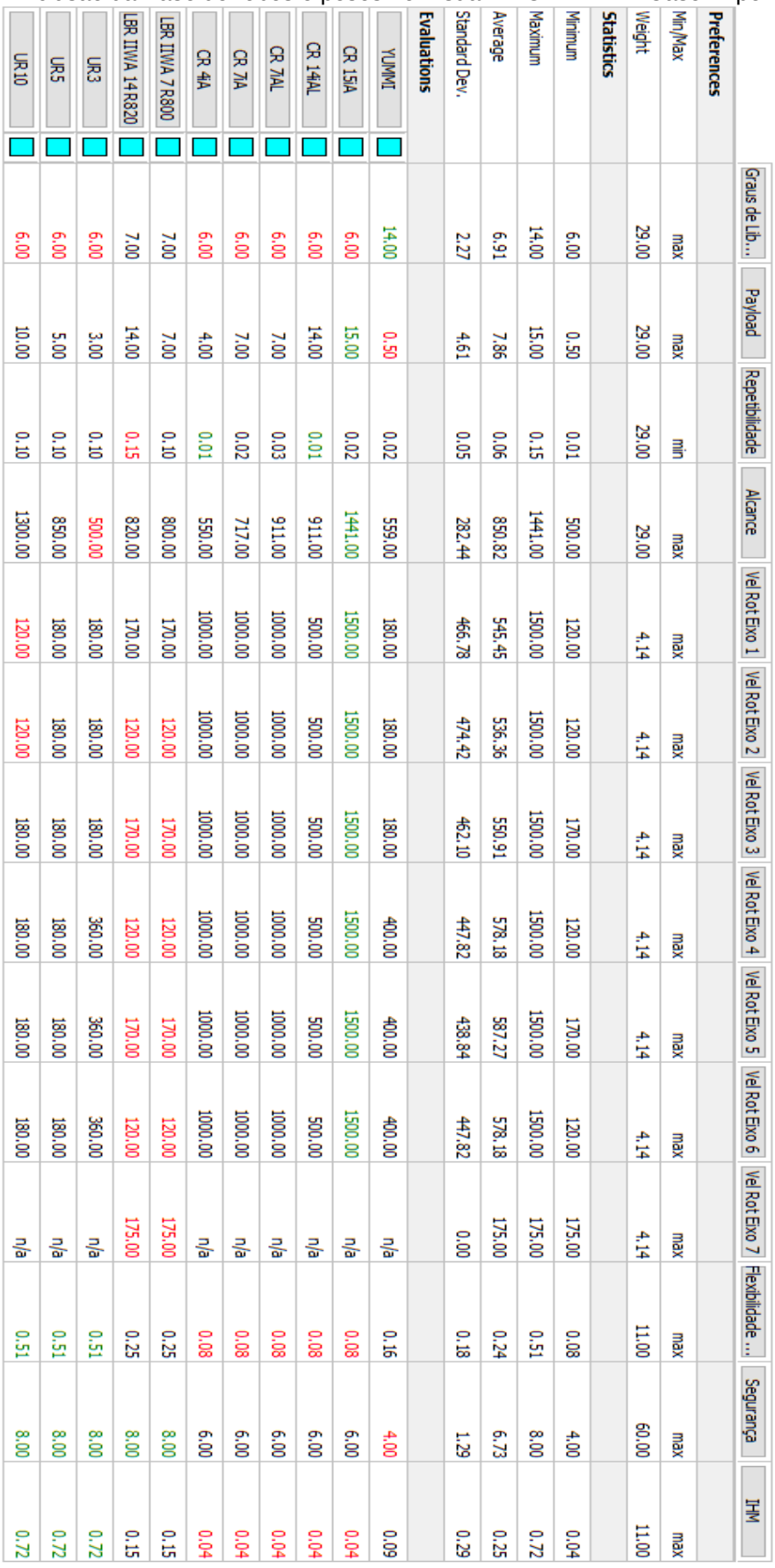
O resultado dessa tabela mostra que os gestores tem uma preferência maior pela interface homem-máquina dos robôs da Universal Robôs com importância de 72%. Após isso eles tem preferência por robôs da KUKA com grau de importância 15%. Depois por robôs da ABB com grau de importancia de 9% e por último, robôs da FANUC com grau de importância de 4%.

5.1.4 Aplicação do PROMETHEE para rankeamento dos Robôs

A partir do momento em que os critérios estão definidos, e os pesos entre grupos e os valores de critérios não funcionais determinados, é possível partir para a última etapa do processo, a aplicação do PROMETHEE para o rankeamento. Para essa etapa utiliza-se a base de robôs fornecida pelo trabalho, aplicando-se a filtragem realizada pelo item 5.1.2 e software *Visual* PROMETHEE.

A primeira parte consiste em cadastrar no *Visual* PROMETHEE (cap 4.6) os robôs filtrados, os pesos e os valores de cada um dos critérios definidos. O resultado disso pode ser visto na Figura 37.

Figura 37 - Inclusão da Base de robôs e pesos no Visual PROMETHEE Caso Experimental 1



	Graus de Lib...	Payload	Repetibilidade	Alcance	Vel Rot Exo 1	Vel Rot Exo 2	Vel Rot Exo 3	Vel Rot Exo 4	Vel Rot Exo 5	Vel Rot Exo 6	Vel Rot Exo 7	Flexibilidade ...	Segurança	IHM
Preferences														
Min/Max	max	max	min	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
Weight	29.00	29.00	29.00	29.00	4.14	4.14	4.14	4.14	4.14	4.14	4.14	11.00	60.00	11.00
Statistics														
Minimum	6.00	0.50	0.01	500.00	120.00	120.00	170.00	120.00	170.00	120.00	175.00	0.08	4.00	0.04
Maximum	14.00	15.00	0.15	1441.00	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	175.00	0.51	8.00	0.72
Average	6.91	7.86	0.06	850.82	545.45	536.36	550.91	578.18	587.27	578.18	175.00	0.24	6.73	0.25
Standard Dev.	2.27	4.61	0.05	282.44	466.78	474.42	462.10	447.82	438.84	447.82	0.00	0.18	1.29	0.29
Evaluations														
YUMMI	14.00	0.50	0.02	559.00	180.00	180.00	180.00	400.00	400.00	400.00	n/a	0.16	4.00	0.09
CR 15iA	6.00	15.00	0.02	1441.00	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	n/a	0.08	6.00	0.04
CR 14iAL	6.00	14.00	0.01	911.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	n/a	0.08	6.00	0.04
CR 7iAL	6.00	7.00	0.03	911.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	n/a	0.08	6.00	0.04
CR 7iA	6.00	7.00	0.02	717.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	n/a	0.08	6.00	0.04
CR 4iA	6.00	4.00	0.01	550.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	n/a	0.08	6.00	0.04
LBR IIWA 7 R800	7.00	7.00	0.10	800.00	170.00	120.00	170.00	120.00	170.00	120.00	175.00	0.25	8.00	0.15
LBR IIWA 14 R820	7.00	14.00	0.15	820.00	170.00	120.00	170.00	120.00	170.00	120.00	175.00	0.25	8.00	0.15
UR3	6.00	3.00	0.10	500.00	180.00	180.00	180.00	360.00	360.00	360.00	n/a	0.51	8.00	0.72
UR5	6.00	5.00	0.10	850.00	180.00	180.00	180.00	180.00	180.00	180.00	n/a	0.51	8.00	0.72
UR10	6.00	10.00	0.10	1300.00	120.00	120.00	180.00	180.00	180.00	180.00	n/a	0.51	8.00	0.72

Fonte: (O Autor, 2020)

Note que critérios como (vi) Graus de liberdade, (i) *Payload*, (ii) Repetibilidade e (vii) Alcance no manipulador tem o mesmo peso, assim como os critérios (v) Interface Homem-Máquina e (iv) Flexibilidade de Programação também tem o mesmo peso. Isso pois em ambos os casos os critérios pertencem a um mesmo grupo, estes a critérios não-funcionais e aqueles a critérios funcionais. O critério (iii) velocidade é composto por 7 velocidades, sendo assim, o peso desse critério foi dividido em 7.

Com todos os dados cadastrados utilizam-se os estudos recomendados no item 4.6. Não é necessário que todos os estudos sejam realizados, visto que muitos deles trazem a mesma informação apresentada de forma diferente.

Serão utilizados os estudos (ii) PROMETHEE *Table* e (iv) *Action Profiles* para o caso experimental 1. Com esses estudos é possível ver o rankeamento completo dos robôs com base nas preferências, e o desempenho dos principais robôs em cada critério. O resultado do estudo (ii) PROMETHEE *Table* pode ser visto na Figura 38.

Figura 38 - Aplicação PROMETHEE *Table* Caso Experimental 1

PROMETHEE Flow Table

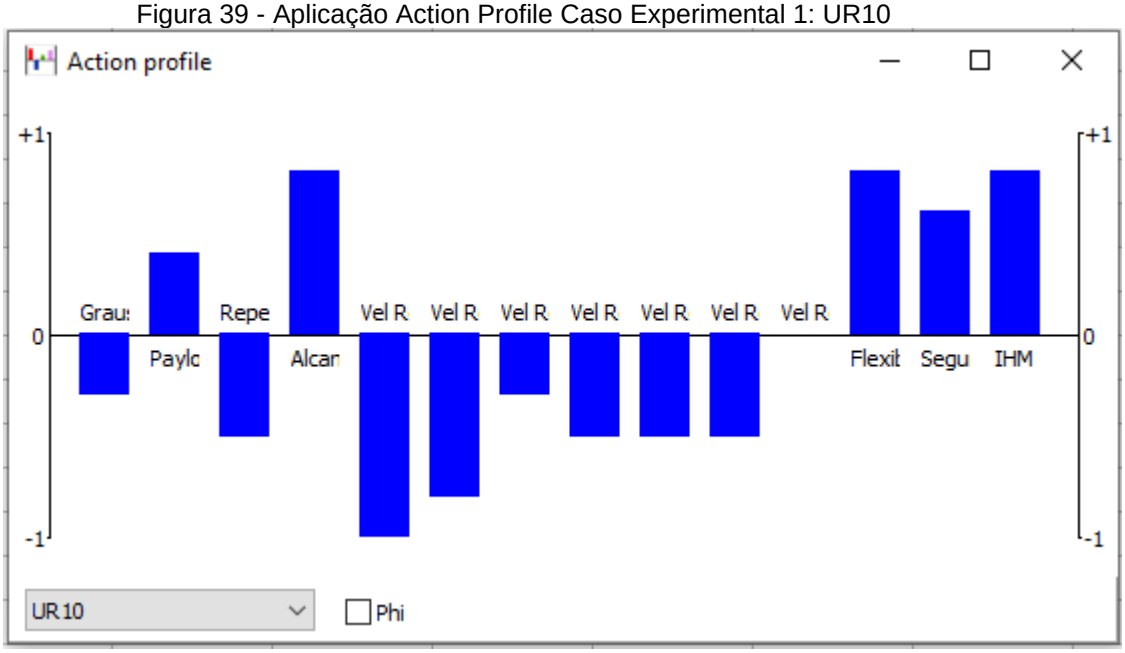
Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	UR10	0.2216	0.4679	0.2463
2	CR 15iA	0.2139	0.4681	0.2542
3	LBR IIWA 14 R820	0.1458	0.4869	0.3411
4	LBR IIWA 7 R800	0.0947	0.4358	0.3411
5	CR 14iAL	0.0880	0.3987	0.3108
6	UR5	0.0683	0.3894	0.3212
7	CR 7iAL	-0.0727	0.3075	0.3801
8	UR3	-0.1198	0.2982	0.4179
9	CR 7iA	-0.1366	0.2691	0.4057
10	CR 4iA	-0.2004	0.2564	0.4568
11	YUMMI	-0.3027	0.3204	0.6231

Fonte: (O Autor, 2020)

O resultado dessa tabela apresenta os robôs UR10, CR15iA e LBR IIWA 14R820 como as 3 melhores recomendações de robôs para a aplicação do caso experimental 1. Isso pois quando somados os desempenhos dos robôs em cada critério resulta-se em um maior *Phi*.

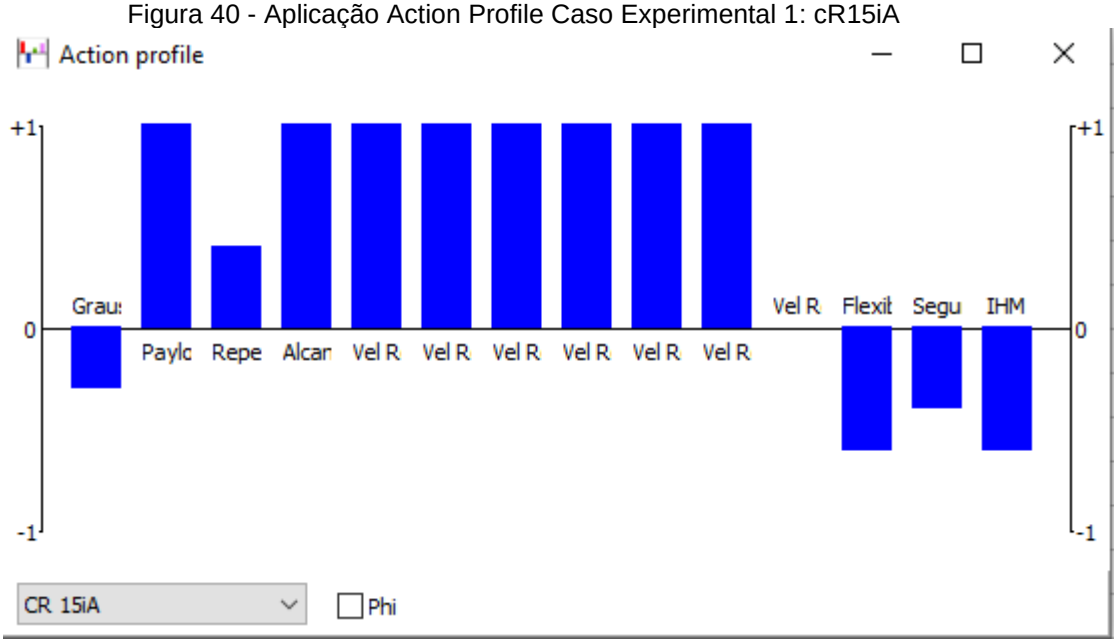
As Figura 39, Figura 40 e Figura 41 demonstram respectivamente os desempenhos dos robôs UR10, CR15iA e LBR IIWA 14R820 nos critérios de avaliação.

Figura 39 - Aplicação Action Profile Caso Experimental 1: UR10



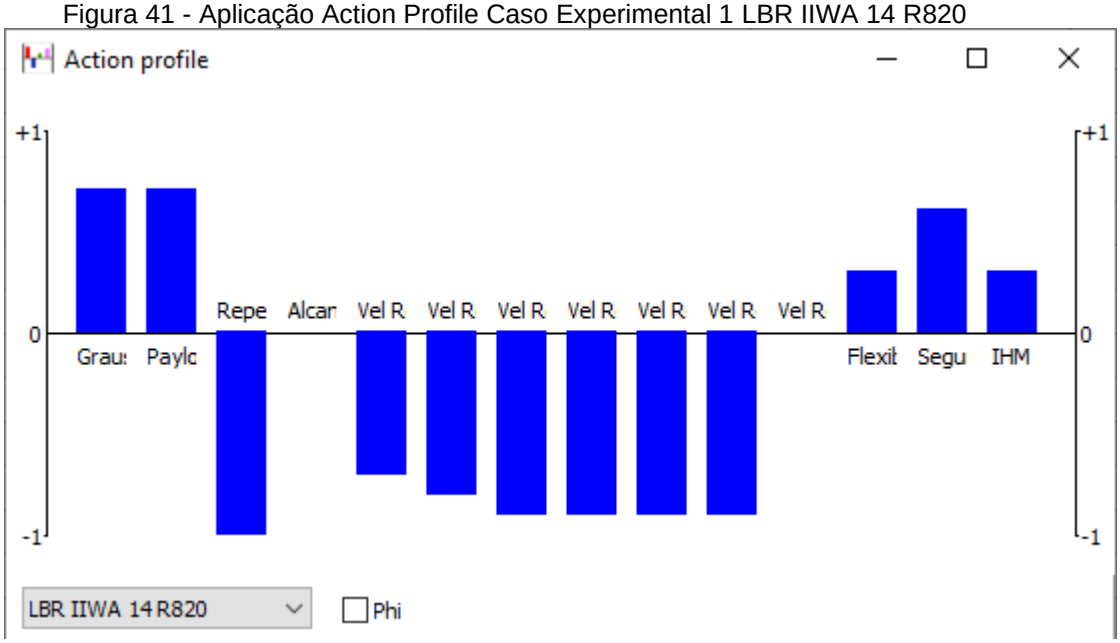
Fonte: (O Autor, 2020)

Figura 40 - Aplicação Action Profile Caso Experimental 1: cR15iA



Fonte: (O Autor, 2020)

Figura 41 - Aplicação Action Profile Caso Experimental 1 LBR IIWA 14 R820



Fonte: (O Autor, 2020)

Essas figuras demonstram que não existe um robô perfeito, alguns robôs se sobrepõem a outros em determinados critérios. Porém, considerando os pesos dados pelos especialistas e considerando o desempenho do robô em todos os critérios, tem-se robôs com phi's mais altos.

5.1.5 Discussão dos resultados

Com base nos dados estudados pela revisão da literatura, em conjunto com o suporte dos especialistas da área de robótico, o modelo foi estruturado e definiram-se as 3 opções de robôs que mais se adequam a aplicação, sendo que: o robô UR10 é a opção mais recomendada, o robô CR15iA a segunda opção mais recomendada e o robô LBR IIWA 14 R820 a terceira opção mais recomendada.

A empresa em questão já havia comprado o robô LBR IIWA 14 R820 antes da utilização do método de apoio a decisão proposto pelo presente trabalho. O resultado disso foi um robô que se enquadra nos requisitos mínimos propostos para utilização, mas, que segundo os especialistas consultados por este trabalho, não é o ideal para a aplicação.

É possível verificar isso, pois a maior reclamação dos profissionais que passam pelo laboratório e especialistas, fora os consultados por esse trabalho, é a dificuldade de programação do robô somados à uma interface homem-máquina não amigável. Isso torna o aprendizado de colaboradores que não tem um conhecimento sobre o

assunto complicado e demorado. Com isso, uma das principais razões da existência do laboratório: ensinar e formar colaboradores em novas tecnologias sem necessidade de cursos externos, fica comprometida.

Os especialistas informaram que, de fato, a utilização do robô UR10 seria mais adequada à aplicação desejada pois critérios como, (i) pay-load, (ii) repetibilidade e (iii) velocidade não são de grande importância para pessoas que querem aprender a usar o robô, fazendo com que os critérios (iv) Flexibilidade de Programação; (v) Interface Homem-Máquina e (ix) segurança sejam consideravelmente mais importantes.

Sendo assim. levando em conta os critérios (iv) Flexibilidade de Programação; (v) Interface Homem-Máquina e (ix) segurança, como feito no presente trabalho, a empresa conseguiria atingir o objetivo principal proposto: formar colaboradores de forma ágil e prática.

Atualmente o laboratório está buscando algum setor da empresa que requeira o robô LBR IIWA 14 R820 em suas aplicações para que, por meio de uma permuta, o robô proposto pelo trabalho posso ser adquirido e instalado.

5.2 CASO EXPERIMENTAL II – IMPLANTAÇÃO DE ROBÔ PARA CHECAGEM DE PEÇAS EM *KITTING*

O processo em questão fica na linha de *kitting* de uma empresa do ramo automobilístico localizada em São José dos Pinhais no Paraná. Uma linha de *kitting* é a responsável pelo abastecimento das linhas de produção com as peças necessárias par a montagem. Este *kitting* é responsável pelas peças de montagem do conjunto dianteiro dos freios, e existem problemas como: (i) peças de freios não estarem aparafusadas, conjuntos de freios estarem soltos; (ii) o conjunto errado de freios ser enviado.

A ideia para solucionar esse problema é a utilização de um sistema que barrasse esses erros antes de eles chegarem na montagem, por meio de um sistema de visão. Usar um sistema de visão fixo já foi uma solução adotada pela empresa em projetos anteriores, mas esse tipo de instalação torna o projeto inflexível, visto que cada vez que uma nova diversidade de peça/carro fosse adicionada, seria preciso adicionar câmeras novas para atender o projeto ou readequar o projeto mecânico.

A utilização de um robô industrial tornaria o projeto muito mais flexível, pois seria necessário somente reprogramar a rota do robô. Ou seja, a cada diversidade adiciona-se uma nova rota na programação e a readequação está finalizada.

A empresa não tinha uma decisão formada sobre utilizar um robô colaborativo ou clássico. Porém, sem que fosse realizada uma mudança em *layout* teriam que ser utilizados robôs colaborativos, visto que a região da instalação possuía uma limitação espacial e não comportava grades de segurança, requisitos obrigatórios de robôs clássicos.

5.2.1 Requisitos mínimos da Aplicação

Nesse capítulo serão respondidas as perguntas elaboradas pelo trabalho para a detecção dos requisitos mínimos da aplicação e a filtragem inicial dos robôs que não são adequados para a aplicação desejada.

- ***Payload***: qual a carga mínima que a aplicação pede? Foi considerado que quanto mais longe a carga está, menos o robô suporta? O *Payload* do robô é calculado em uma distância menor que o alcance máximo;

R.: o robô deve conseguir suportar a camera, que pesa aproximadamente 1kg.

- **Velocidade: q**ual a velocidade mínima que o robô pode se locomover para realizar a atividade necessária? Qual o tempo de ciclo necessário para a aplicação?
  R.: a linha tem uma cadencia de 64 veiculos por hora. Os robôs com melhor desempenho na método de apoio a decisão serão testados pela empresa no sofware Process Simulate e RobCaD para verificar se o robô se adequa a aplicação. Esses softwares conseguem realizar estudos que consideram a desaceleração/aceleração e isso é importante para a aplicação.

- **Precisão de posicionamento**: qual a precisão que o robô deve ter? São peças que requerem uma precisão milimétrica? As peças podem ter um erro de posicionamento?
  R.: Não existe uma precisão de posicionamento necessária para a aplicação. A peça pode vir de qualquer maneira possível e o sistema de visão teria que aprender e se adequar.

- **Capacidade de memória**: o robô precisa ter uma memória grande para a aplicação desejada? A programação será realizada toda dentro dele ou um CLP mandará os comandos?
  R.: Não. Pois todo sistema de fotos ficava salvo em um HD e não na memória do robô.

- **Contrato de Serviço do Fornecedor**: existe algum contrato com fornecedor que impeça a compra de robôs de outros fabricantes?
  R.: Sim. A empresa tem contrato com diversos fornecedores, porém no momento priorizam-se robôs da FANUC nos robôs industriais clássicos. Nos robôs colaborativos, só podem ser comprados robôs homologados pela frança, que são dos fabricantes: FANUC, KUKA, Universal Robots e ABB.

- **Grau de liberdade**: o robô precisa de no mínimo quantos graus de liberdade para realizar a operação?
  R.: Precisa de no minimo 6 graus de liberdade.

- **Alcance do manipulador**: qual alcance mínimo que o robô deve ter para realizar a operação? Esse alcance pode ser Alcance vertical ou alcance horizontal;
  R.: Não existe alcance mínimo para a aplicação pois é possível aproximar o robô da atividade.

- **Material do robô**: o material que é feito o robô gera algum problema para a aplicação? Alguns robôs colaborativos são emborrachados.
  R.: Não.

- **Fonte de energia**: qual a alimentação da fábrica? É possível energizar o robô?
  R.: a fábrica tem pontos de 220v e 380v.

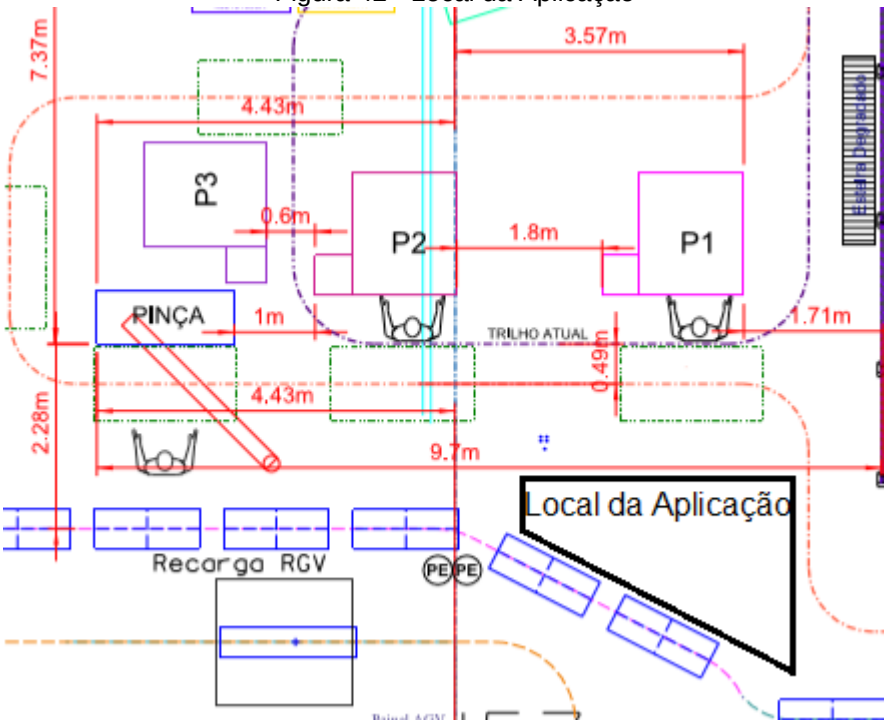
- **Facilidade de programação**: existem especialistas para programar esse robô? É necessária uma empresa terceira ou o robô será programado internamente?
  R.: Não foi cogitada uma programação interna na empresa, a ideia é contratar um robotista especializado no assunto.

- **Peso do robô**: o peso do robô pode impactar no transporte, na movimentação e no espaço em que será instalado. O local consegue fornecer sustentação ao robô e aos movimentos que serão realizados?
  R.: Não existe um peso máximo calculado no momento, mas priorizam-se robôs com peso menor possível.

- **Tamanho do robô**: existe uma limitação de tamanho no local em que será instalado o robô?

R.: Sim. Existe uma limitação de área que o robô podia ser implantado de no máximo 1.5m.

Figura 42 - Local da Aplicação



Fonte: (O Autor, 2020)

- **Ação Colaborativa**: o robô irá funcionar de forma colaborativa? Serão realizados treinamentos aos colaboradores que irão trabalhar com esse robô? Será sinalizada a área?

  R.: Sim será colaborativo. Serão realizados treinamentos para a equipe de manutenção e com os colaboradores que trabalham na região de funcionamento do robô e sobre a sinalização: a área deve ser sinalizada como colaborativa.

Com base nas respostas dadas, foi gerado um compilado de forma a facilitar o capítulo seguinte, filtragem inicial dos robôs. O resultado disso é o Quadro 10.

Quadro 10 - Resumo Requisitos mínimos da aplicação Caso Experimental 2

Pergunta realizada sobre:	Resposta
Payload	**Robôs com mais de 1kg de *Payload***
Velocidade	**Serão utilizados softwares de simulação pós processo decisório**
Precisão de posicionamento	Não é um fator limitante para a aplicação

Capacidade de memória	Não é um fator limitante para a aplicação
Contrato de Serviço do Fornecedor	**Somente robôs FANUC, KUKA, Universal Robots e ABB**
Grau de liberdade	**No mínimo 6 graus de liberdade**
Alcance do manipulador	Não é um fator limitante para a aplicação
Material do robô	Não é um fator limitante para a aplicação
Fonte de energia	**Somente robôs com alimentação 220v ou 380v**
Facilidade de programação	Não é um fator limitante para a aplicação
Peso do robô	Não é um fator limitante para a aplicação
Tamanho do robô	**Somente robôs com no máximo 150cm de alcance**
Ação Colaborativa	**Somente robôs colaborativos**

Fonte: (O Autor, 2020)

5.2.2 Filtragem inicial dos Robôs

Nesse momento é realizada a filtragem inicial dos robôs. Para isso utilizam-se as respostas sobre os requisitos mínimos da aplicação como forma de filtro para o apêndice A.

Foram mantidos, e permaneceram na tabela após a aplicação do filtro:

(i) Robôs com *payload* maior que 1kg;

(ii) Robôs que fossem de fornecedores homologados pela empresa: FANUC, KUKA, Universal Robots e ABB;

(iii) Robôs com grau de liberdade maior ou igual a 6;

(iv) Robôs que tenham no máximo 150cm de alcance;

(v) Robôs que desempenhassem atividades colaborativas.

Após isso, e, considerando que todos os robôs restantes preenchem os requisitos mínimos, a tabela filtrada foi detalhada no apêndice C.

5.2.3 Escolha dos critérios de decisão e aplicação do método de MUDGE

Para seleção do robô o decisor optou por utilizar alguns dos critérios com maior relevância na revisão da literatura, como: (i) *Payload*; (ii) Repetibilidade; (iii) Velocidade; (iv) Flexibilidade de Programação; (v) Graus de liberdade; e (vi) Segurança, que poderá ser verificada com o PLr do robô. Por mais que sejam critérios presentes como mais relevantes na literatura alguns critérios não foram escolhidos, e os motivos são os seguintes: o critério capacidade de memória não será utilizado, pois

não é relevante na aplicação desejada, toda informação do sistema de visão ficará em HD; o contrato de serviço com fornecedor é um critério limitante no trabalho, robôs que não estão com contrato não podem ser utilizados; a qualidade de serviço do fornecedor, não será utilizado, pois parte-se da ideia de que se já existem contratos com os fornecedores, eles têm bons serviços; a interface-homem máquina não será utilizada pois a programação será feita por especialistas fora da empresa; e alcance no manipulador pois esse é um critério limitante.

Esses critérios ficam estruturados nos seguintes grupos:

(i) **Grupo para critérios de segurança**: (vi) Segurança ou PLr do robô;

(ii) **Grupo para critérios funcionais**: (i) *Payload;* (ii) Repetibilidade; (iii) Velocidade; e (v) Graus de liberdade;

(iii) **Grupo para critérios não-funcionais**: (iv) Flexibilidade de Programação.

Com os critérios definidos e divididos em grupos, vem a parte da atribuição de preferências utilizando-se a tabela de MUDGE (cap 4.2). Para que existisse maior acuracidade e confiabilidade nos pesos, foi solicitado que 4 especialistas preenchessem cada um, uma tabela. Algumas informações sobre eles:

1. Engenheiro Eletricista graduado pela universidade Federal do Paraná, com especialização em automação industrial pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná e habilitado como *Safety technician* pela *TÜV Rheinland*. Possui 10 anos de experiência na indústria automotiva nos setores de manutenção e automação industrial.
2. Engenheiro de Controle e Automação graduado pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná e habilitado como *Safety technician* pela *TÜV Rheinland*. Possui om 6 anos de experiência na indústria automotiva nos setores de performance e automação industrial.
3. Tecnólogo em Mecatrônica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, especialista em Capacitação em Energia Renovável e habilitado como *Safety technician* pela *TÜV Rheinland*. Possui 12 anos de experiência com desenvolvimento de projetos e automação industrial.

4. Engenheiro Eletricista com ênfase em Telecomunicações graduado pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Possui 25 anos de experiência em setores de automação industrial.

A primeira tabela elaborada foi a tabela de priorização de grupos, Tabela 26. O intuito dessa tabela é verificar quais grupos são mais importantes para os especialistas.

Tabela 26 - Priorização dos Grupos Caso Experimental 2

C_1	C_2	C_3	Total:	Porcentual:
C_1			$\sum C_1$	$\frac{\sum C_1}{\sum C_1 + \sum C_2 + \sum C_3}$
	C_2		$\sum C_2$	$\frac{\sum C_2}{\sum C_1 + \sum C_2 + \sum C_3}$
		C_3	$\sum C_3$	$\frac{\sum C_3}{\sum C_1 + \sum C_2 + \sum C_3}$

Fonte: (O Autor, 2020)

- C_1 = Grupo de segurança;
- C_2 = Grupo para critérios funcionais;
- C_3 = Grupo para critérios não-funcionais.

Após cada especialista ter preenchido sua tabela, somou-se a coluna “Total” e calculou-se a coluna “Porcentual”, obtendo como resultado a Tabela 27.

Tabela 27 - Priorização dos Grupos Caso Experimental 2: resultado

C_1	C_2	C_3	Total:	Porcentual:
C_1	$\sum$	$\sum$	14	48%
	C_2	$\sum$	5	17%
		C_3	10	35%

Fonte: (O Autor, 2020)

O resultado dessa tabela mostra que os gestores tem uma preferência maior por robôs que tenham desempenho maior no grupo de segurança gerando um grau de importância 48% nessa categoria. Após isso eles tem preferência por robôs que

tenham desempenho maior no grupo de critérios não-funcionais com grau de importância 35% e por último, robôs com desempenho maior no grupo de critérios funcionais com grau de importância 17%.

A segunda tabela elaborada foi a de comparação par a par dos robôs no critério (iv) Flexibilidade de programação, Tabela 28. O intuito dessa tabela foi dar valores ao critério (iv) Flexibilidade de programação, critério subjetivo em um primeiro momento e sem um valor exato, que pode variar de processo decisório para processo decisório. Os valores presentes na coluna “total” de cada um dos fabricantes, irá representar todos os robôs desse mesmo fabricante.

Tabela 28 - Priorização do critério Flexibilidade Caso Experimental 2

F_1	F_2	F_3	F_4	Total:	Porcentual:
F_1				$\sum F_1$	$\frac{\sum F_1}{\sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4}$
	F_2			$\sum F_2$	$\frac{\sum F_2}{\sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4}$
		F_3		$\sum F_3$	$\frac{\sum F_3}{\sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4}$
			F_4	$\sum F_4$	$\frac{\sum F_4}{\sum F_1 + \sum F_2 + \sum F_3 + \sum F_4}$

Fonte: (O Autor, 2020)

- $F_1 =$ ABB (Os colaborativos ABB têm programação igual aos convencionais ABB);
- $F_2 =$ FANUC (Os colaborativos FANUC têm programação igual aos convencionais FANUC);
- $F_3 =$ KUKA (O colaborativo KUKA é em JAVA e bibliotecas específicas de robótica);
- $F_4 =$ Universal Robots.

Após cada especialista ter preenchido sua tabela, somou-se a coluna “Total” e calculou-se a coluna “Porcentual”, obtendo como resultado a Tabela 23

Tabela 29 - Priorização do critério Flexibilidade Caso Experimental 2: resultado

F_1	F_2	F_3	F_4	Total:	Porcentual:

F_1	∑	∑	∑	8	16%
	F_2	∑	∑	4	8%
		F_3	∑	13	25%
			F_4	26	51%

Fonte: (O Autor, 2020)

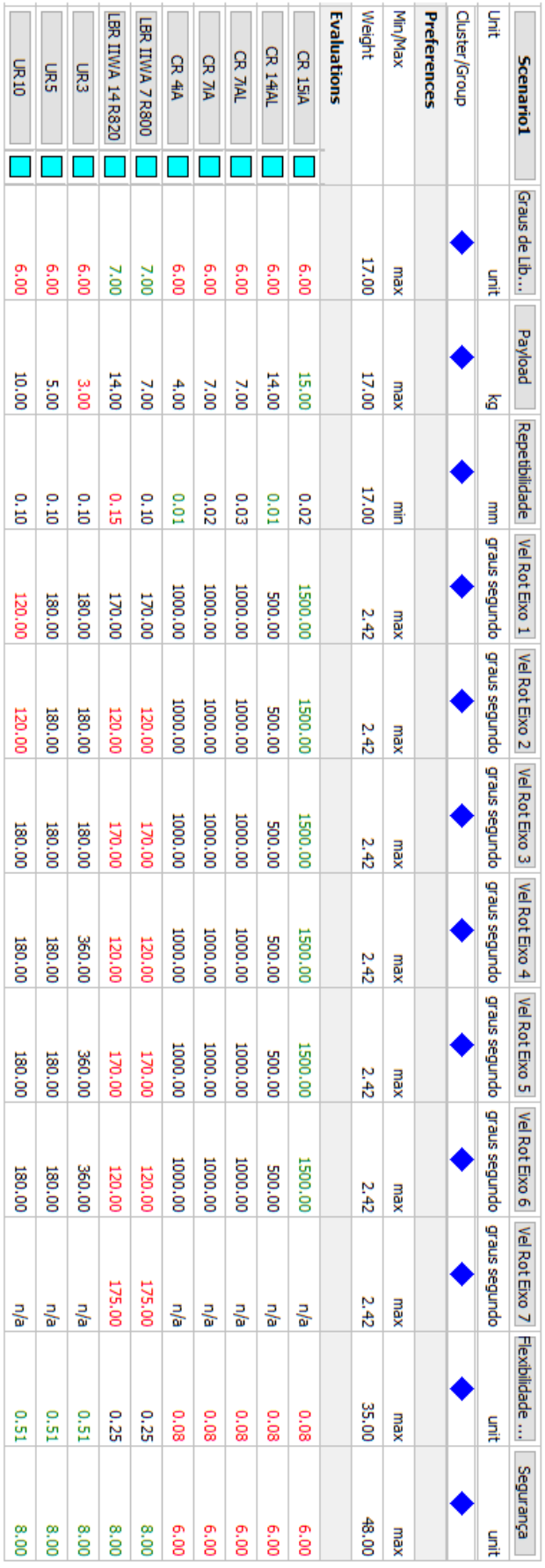
O resultado dessa tabela mostra que os gestores tem uma preferência maior pela flexibilidade dos robôs da Universal *Robots* com importância de 51%. Após isso eles tem preferência por robôs da KUKA com grau de importância 25%. Depois por robôs da ABB com grau de importancia de 16% e por último, robôs da FANUC com grau de importância de 8%.

5.2.4 Aplicação do PROMETHEE para rankeamento dos Robôs

A partir do momento em que os critérios estão definidos, e os pesos entre grupos e os valores de critérios não funcionais determinados, é possível partir para a última etapa do processo, a aplicação do PROMETHEE para o rankeamento. Para essa etapa utiliza-se a base de robôs fornecida pelo trabalho, aplicando-se a filtragem realizada pelo item 5.1.2 e software *Visual* PROMETHEE.

A primeira parte consiste em cadastrar no *Visual* PROMETHEE (cap 4.6) os robôs filtrados, os pesos e os valores de cada um dos critérios definidos. O resultado disso pode ser visto na Figura 43.

Figura 43 - Inclusão da Base de robôs e pesos no Visual PROMETHEE Caso Experimental 2



Scenario1	Graus de Lib...	Payload	Repetibilidade	Vel Rot Eixo 1	Vel Rot Eixo 2	Vel Rot Eixo 3	Vel Rot Eixo 4	Vel Rot Eixo 5	Vel Rot Eixo 6	Vel Rot Eixo 7	Flexibilidade ...	Segurança
Unit	unit	kg	mm	graus segundo	graus segundo	graus segundo	graus segundo	graus segundo	graus segundo	graus segundo	unit	unit
Cluster/Group												
Preferences												
Min/Max	max	max	min	max	max	max	max	max	max	max	max	max
Weight	17.00	17.00	17.00	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	35.00	48.00
Evaluations												
CR 15iA	6.00	15.00	0.02	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	n/a	0.08	6.00
CR 14iAL	6.00	14.00	0.01	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	n/a	0.08	6.00
CR 7iAL	6.00	7.00	0.03	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	n/a	0.08	6.00
CR 7iA	6.00	7.00	0.02	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	n/a	0.08	6.00
CR 4iA	6.00	4.00	0.01	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	n/a	0.08	6.00
LBR IIWA 7 R800	7.00	7.00	0.10	170.00	120.00	170.00	120.00	170.00	120.00	175.00	0.25	8.00
LBR IIWA 14 R820	7.00	14.00	0.15	170.00	120.00	170.00	120.00	170.00	120.00	175.00	0.25	8.00
UR3	6.00	3.00	0.10	180.00	180.00	180.00	360.00	360.00	360.00	n/a	0.51	8.00
UR5	6.00	5.00	0.10	180.00	180.00	180.00	180.00	180.00	180.00	n/a	0.51	8.00
UR10	6.00	10.00	0.10	120.00	120.00	180.00	180.00	180.00	180.00	n/a	0.51	8.00

Fonte: (O Autor, 2020)

Note que critérios como, (i) *Payload*, (ii) Repetibilidade e (v) Graus de liberdade tem o mesmo peso, pois os critérios pertencem a um mesmo grupo. O critério (iii) velocidade é composto por 7 velocidades, sendo assim, o peso desse critério foi dividido em 7.

Com todos os dados cadastrados utilizam-se os estudos recomendados no item 4.6. Não é necessário que todos os estudos sejam realizados, visto que muitos deles trazem a mesma informação apresentada de forma diferente.

Serão utilizados os estudos (ii) PROMETHEE *Table* e (iv) *Action Profiles* para o caso experimental 1. Com esses estudos é possível ver o rankeamento completo dos robôs com base nas preferências, e o desempenho dos principais robôs em cada critério. O resultado do estudo (ii) PROMETHEE *Table* pode ser visto na Figura 44.

Figura 44 - Aplicação PROMETHEE *Table* Caso Experimental 2

PROMETHEE Flow Table

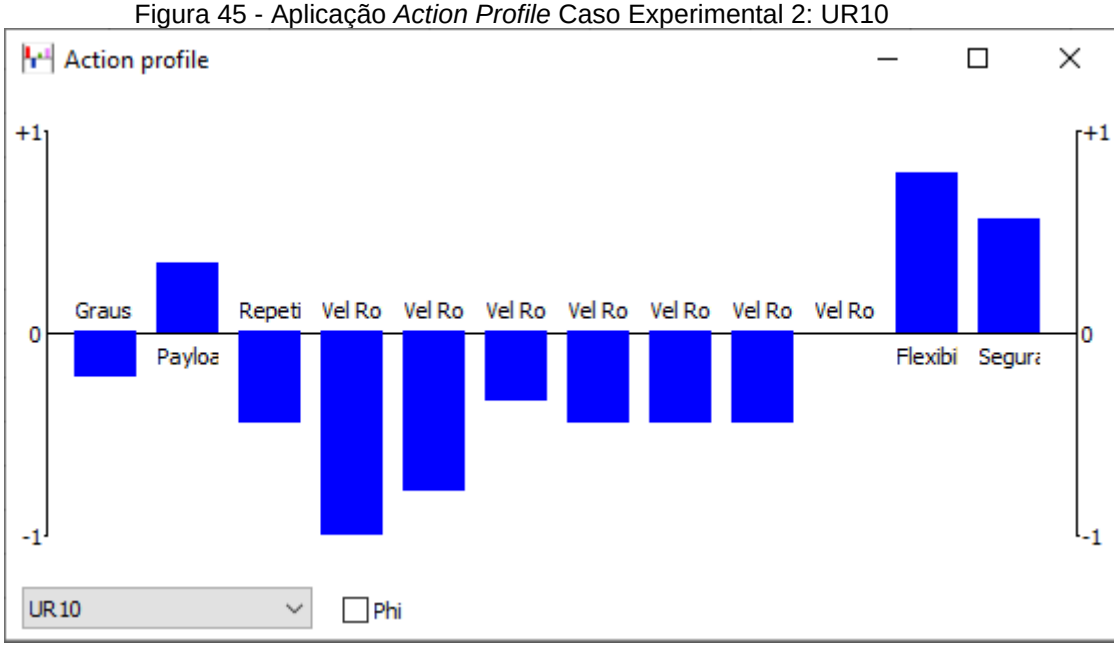
Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	UR10	0.2643	0.4589	0.1946
2	LBR IIWA 14 R820	0.2106	0.4950	0.2844
3	LBR IIWA 7 R800	0.1856	0.4574	0.2719
4	UR5	0.1855	0.4195	0.2340
5	UR3	0.1515	0.4052	0.2537
6	CR 15iA	-0.0716	0.2839	0.3555
7	CR 14iAL	-0.1446	0.2412	0.3858
8	CR 7iA	-0.2395	0.1768	0.4163
9	CR 4iA	-0.2646	0.1768	0.4413
10	CR 7iAL	-0.2771	0.1642	0.4413

Fonte: (O Autor, 2020)

O resultado dessa tabela apresenta os robôs UR10, LBR IIWA 14R820 e LBR IIWA 7R800 como as 3 melhores recomendações de robôs para a aplicação do caso experimental 1. Isso pois quando somados os desempenhos dos robôs em cada critério resulta-se em um maior *Phi*.

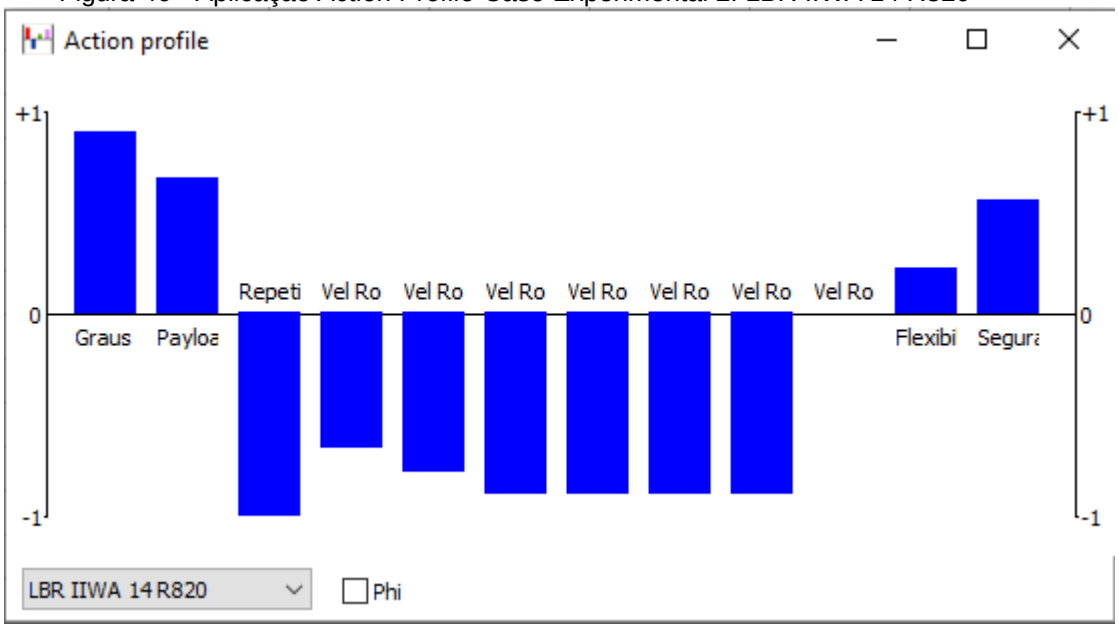
As Figura 45, Figura 46 e Figura 47 demonstram respectivamente os desempenhos dos UR10, LBR IIWA 14R820 e LBR IIWA 7R800 nos critérios de avaliação.

Figura 45 - Aplicação *Action Profile* Caso Experimental 2: UR10



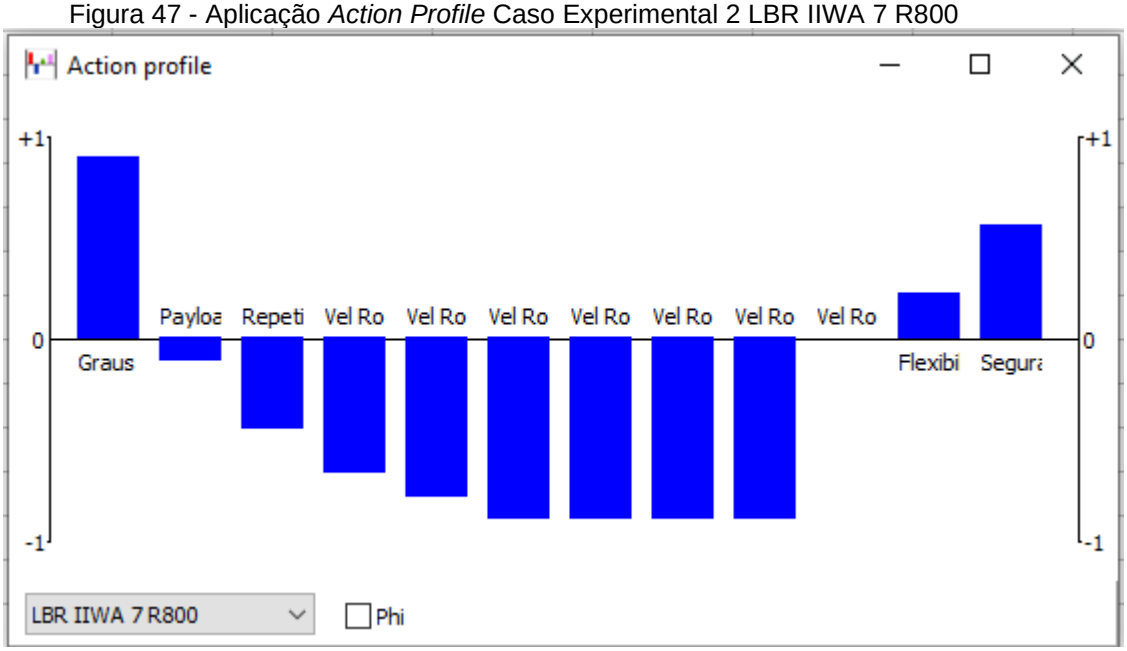
Fonte: (O Autor, 2020)

Figura 46 - Aplicação *Action Profile* Caso Experimental 2: LBR IIWA 14 R820



Fonte: (O Autor, 2020)

Figura 47 - Aplicação *Action Profile* Caso Experimental 2 LBR IIWA 7 R800



Fonte: (O Autor, 2020)

Essas figuras demonstram que não existe um robô perfeito, alguns robôs se sobrepõem a outros em determinados critérios. Porém, considerando os pesos dados pelos especialistas e considerando o desempenho do robô em todos os critérios, tem-se robôs com *phi's* mais altos.

5.2.5 Discussão dos Resultados

Com base nos dados estudados pela revisão da literatura, em conjunto com o suporte dos especialistas da área de robótico, o modelo foi estruturado e definiram-se as 3 opções de robôs que mais se adéquam a aplicação, sendo que: o robô UR10 é a opção mais recomendada, o robô LBR IIWA 14 R820 a segunda opção mais recomendada e o robô LBR IIWA 7 R800 a terceira opção mais recomendada.

A escolha final de robô por parte da empresa foi o robô UR10, o robô com o melhor resultado dentre os robôs do processo decisório. O principal fator que levou a empresa a realizar essa escolha foi a flexibilidade de programação. Em um primeiro momento, o robô será programado por uma empresa terceira, mas em caso de uma nova diversidade para a linha, a equipe local será a responsável pela programação, logo, ter um robô mais flexível e mais fácil de programar é priorizado.

Durante a instalação e testes do robô foi descoberta uma limitação por norma de segurança da velocidade para trabalhos colaborativos, algo que a empresa e o

modelo proposto não haviam considerado. Para atender a cadência da linha era necessária uma velocidade superior à velocidade máxima de funcionamento permitida para os robôs colaborativos sem nenhum equipamento externo de segurança. Isso gerou uma preocupação na empresa, mas a solução foi simples: colocar um sensor de área que permitisse o robô o funcionamento no modo de monitoramento de velocidade e separação, cumprindo as normas da ISO15066.

Esse empecilho foi extremamente importante para o trabalho por permitir a visão de que existem problemas não pensados nos requisitos mínimos de aplicação, permitindo assim uma evolução importantíssima nessa área.

5.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

Por meio dos dois casos experimentais foi possível ver que o método de apoio a decisão proposto consegue fornecer dados coerentes com as escolhas da empresa e de forma academicamente embasada, auxiliando os tomadores de decisão em seus processos na área da robótica industrial. O método de apoio a decisão fez com que o processo fosse mais assertivo, se comparado às escolhas sem ela, e em ambos os casos ficou bem claro para os gestores que o robô com melhor *phi* de fato era o melhor para a aplicação.

Além disso, utilizando a abordagem, o processo decisório ocorreu de forma ágil. Sem ela, seria necessária uma revisão dos requisitos mínimos da aplicação, o que comumente demanda bastante tempo, visto que não podem ser esquecidos nenhum dos requisitos mínimos da aplicação. Outro ponto importante é que os critérios não-funcionais, foram quantificados, e isso fez com que um critério que variasse de pessoa a pessoa tivesse um valor estruturado.

Futuramente, caso a empresa sinta necessidade de mudar os pesos dados aos grupos e critérios não-funcionais, por conta de uma mudança de suas prioridades e objetivos, é possível. Neste caso será necessário realizar uma nova aplicação do método MUDGE para recalculo dos pesos, ou trabalhar com a análise de sensibilidade fornecida pelo método PROMETHEE.

O último caso experimental mostrou que mais perguntas poderiam ser elaboradas para a verificação dos requisitos mínimos da aplicação, uma vez que um

fator limitante da operação, a velocidade máxima sem acessórios externos de segurança, não havia sido considerado.

6 CONCLUSÃO

No momento atual, as indústrias estão sendo desafiados a gerar processos cada vez mais automatizados, em busca de uma produção ágil, customizável e com alta qualidade. Nesse cenário, uma nova revolução industrial, apresentada como indústria 4.0 tem emergido. Dentro dessa revolução industrial, algumas tecnologias são definidas como seus principais pilares, sendo uma dessas a robótica autônoma e colaborativa. A robótica autônoma e colaborativa é um pilar de grande foco nessa revolução, pois consegue suprir a alta demanda exigida de velocidade, customização e padrão de qualidade nos processos produtivos, com a característica de permitir trabalhos colaborativos, que no que lhe concerne permitem processos produtivos que combinam a precisão da robótica com a capacidade humana de reagir em situações não programadas.

Essa revolução industrial fomentou uma alta no mercado de robôs industriais clássicos e colaborativos, que, somados a cada vez mais variáveis nos processos decisórios, faz com que o processo decisório se torne cada vez mais complexo. Motivado por essa dificuldade, o presente trabalho elaborou um método de apoio a decisão para auxiliar os gestores nos seus processos decisórios na área da robótica industrial clássica e colaborativa.

Para a elaboração do método de apoio a decisão, algumas etapas tiveram que ser realizadas. Primeiramente fez-se uma revisão bibliográfica sobre os robôs, buscando entender o que significava um robô, como eles eram distribuídos pelas normas regulamentadoras e quais os termos eram utilizados nessa área. Esse estudo resultou na definição do espaço problema do trabalho: robôs que estivessem na robótica industrial articulada clássica e colaborativa.

O próximo passo foi entender quais variáveis, critérios e métodos MCDM eram utilizados em um processo de decisório de robôs industriais além de “o que significavam esses critérios”. Para isso realizou-se uma revisão bibliográfica com a leitura de todos os autores envolvidos no assunto, onde a cada leitura eram extraídos e preenchidos em uma tabela os dados relacionados a critérios e métodos multicritério.

Com esses dados foi possível elaborar método de apoio a decisão especialista que considerava toda a revisão, considerando e expondo os critérios mais utilizados

para os gestores, uma etapa inicial de filtragem de robôs e agrupamento de critérios, uma etapa de atribuição de pesos aos grupos e critérios não-funcionais e, por último, por meio da aplicação do PROMETHEE o processo de rankeamento total dos robôs.

O método de apoio a decisão foi utilizado em dois processos decisórios em uma empresa automobilística localizada em São José dos Pinhais, PR. No primeiro modelo a empresa já havia optado e comprado um robô sem a utilização da abordagem, e confirmaram que o robô sugerido pelo processo decisório teria se saído melhor do que o comprado previamente para a aplicação. O segundo estudo de caso sugeriu um robô para a empresa, e a empresa apoiou a escolha. Neste caso houve um problema não considerado pelas perguntas propostas pela parte dos requisitos mínimos da aplicação que foi “a velocidade máxima para aplicação sem dispositivos externos de segurança”. Por meio dos estudos realizados sobre a norma ISO15066, a empresa conseguiu enquadrar o robô na atividade colaborativa 2 “Monitoramento de Velocidade e Separação” e fazendo assim com que o projeto fosse readequado.

É possível dizer que, através uma abordagem científica, utilizando a revisão dos critérios e literatura existentes, e uma entrega tecnológica com os casos experimentais, é possível criar um modelo multicritério que forneça dados suficientes e um caminho no qual tomadores de decisão na área da robótica industrial possam seguir de modo a escolherem de forma assertiva um robô industrial clássico ou colaborativo.

6.1 PERSPECTIVAS FUTURAS

Baseado nos dois casos experimentais realizados foi possível verificar alguns pontos de melhorias futuras para o trabalho. Primeiramente a quantidade de perguntas realizadas nos requisitos mínimos da aplicação poderia ser maior. No caso experimental 2 foi possível ver que a velocidade máxima para uma ação colaborativa sem periféricos de segurança não foi considerada, e sempre que se fala em trabalho colaborativo, todos os pontos devem ser considerados de modo a garantir-se a segurança dos envolvidos direta e indiretamente no processo.

Outro ponto que o trabalho poderia ser melhorado ou evoluído é na parte da implantação de robôs em atividades colaborativas. Isso, pois além de a escolha do robô ser um grande problema, é extremamente necessário saber como realizar a

implantação desses robôs para que sejam definidas mais perguntas para a secção de requisitos mínimos.

Durante a elaboração da base de robôs presente nos apêndices ficou claro que muitas informações, como tempo de ciclo e segurança, não são passadas nos datasheets dos fabricantes. Sendo assim, um passo importante a ser considerado em trabalhos futuros é um levantamento de dados direto com o fabricante, de modo a certificar que todos, ou a maioria, dos critérios foram catalogados, permitindo assim seu uso no processo decisório.

O trabalho ficou focado no escopo definido no item 3.1, onde só considerou os robôs industriais articulados clássicos e colaborativos. Essa abordagem poderia ser aplicada a outros modelos de robôs, como cartesianos, por exemplo, com a mesma finalidade: escolher de forma ágil o robô mais indicado para a operação desejada.

A proposta do método de apoio a decisão para a seleção de robôs industriais (clássicos ou colaborativos) aplicado a sistemas de manufatura flexível não considerou o custo como um fator de escolha. A escolha pela não utilização dessa restrição era permitir uma visão aos gestores do que realmente é melhor quando olhasse para as funcionalidades do robô e os critérios não subjetivos que importam para eles. Muitas vezes o custo age como um restringente nos processos decisórios, e muitos robôs que têm um custo baixíssimo, acabariam aparecendo como os mais recomendados. Sendo assim, para um trabalho futuro, esse fator poderia ser considerado após a aplicação da abordagem proposta como uma forma de verificação de outro cenário de escolha.

REFERÊNCIAS

ADEPT. (26 de Agosto de 2010). *Adept Quattro s650 H*. Fonte: robotic Turnkey Solutions: http://roboticturnkeysolutions.com/robots/adept/datasheet/Quattro.pdf

Akella, P., Peshkim, M., Colgate, E., Wannasuphoprasit, W., Nagesh, N., Wells, J., . . . Peacock, B. (Maio de 1999). Cobots for the Automobile Assembly Line. *International Conference on Robotics & Automation*, 728-733.

Almeida, A. T. (2011). *O Conhecimento e o Uso de Métodos Multicritério de Apoio a Decisão.* Recife: editora Universitária da UFPE.

Amaral, S. d. (18 de Março de 2009). *Fundamentos de Robótica*. Fonte: UDESC: http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/silas/materiais/14___Morfologia_dos_Manipuladores.pdf

Athawale, V. M., & Chakraborty, S. (2010). Facility Location Selection using PROMETHEE II Method. *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Dhaka*, 59-64.

Athawale, V. M., & Chakraborty, S. (2011). A comparative study on the ranking performance of some multi-crteria decision-making methods for industrial robot selection. *International Journal of Industrial Engineering Computations, 2*(4), 831-850. doi:10.5267/j.ijiec.2011.05.002

Bairagi, B., Dey, B., Sarkar, B., & Sanyal, S. (30 de January de 2014). Selection of robot for automated foundry operations. *International Journal of Management Science and, 9*(3), 221–232. doi:https://doi.org/10.1080/17509653.2014.880076

Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis: an Integrated Approach.* Kluwer Academic Publishers.

Beverage Industry. (Dezembro de 2012). Automated guided vehicles project continued growth: flexibility, safety entice distribution centers. *Beverage Industry*, S6.

Bhangale, P., Agrawal, V., & Saha, S. (Dezembro de 2004). Attribute based specification, comparison and selection of a robot. *Mechanism and Machine Theory, 39*(12), 1345-1366. doi:https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2004.05.020

Bhattacharya, A., Sarkar, B., & Mukherjee, S. K. (Janeiro de 2005). Integrating AHP with QFD for robot selection under requirement perspective. *International*

Journal of Production Research, 43(17), 3671-3685. doi:https://doi.org/10.1080/00207540500137217

Bloss, R. (2016). Collaborative robots are rapidly providing major improvements in productivity, safety, programing ease, portability and cost while addressing many new applications. *Industrial Robot: an International Journal, 5*, 463-468. doi:https://doi.org/10.1108/IR-05-2016-0148

Brans, J. P. (1982). L'ingénièrie de la décision; Elaboration d'instruments d'aide à la décision, La méthode PROMETHEE. *L'aide à la décision: Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir* (pp. 183-213). Québec: r. Nadeau and M. Landry.

Brans, J. P. (9 de Agosto de 1996). The space of freedom of the decision maker modelling the human brain. *European Journal of Operational Research, 92*(3), 593-602. doi:https://doi.org/10.1016/0377-2217(96)00012-4

Brans, J. P., & de Smet, Y. (Janeiro de 2016). PROMETHEE methods. Em S. Greco, M. Ehrgott, & J. R. Figueira, *Multiple Criteria Decision Analysis State of the Art Surveys* (pp. 87-219).

Brans, J. P., & Vincke, P. (Junho de 1985). A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria. *Management Science, 31*(6), 647-656. Fonte: www.jstor.org/stable/2631441?origin=JSTOR-pdf

Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How Virtualization, Decentralization and Network. *International Journal of Information and Communication Engineering*, *8*, pp. 37-38. Acesso em 03 de october de 2018, disponível em http://waset.org/publications/9997144

Bridgman, R. (2004). DK Eyewitness Books: robot. DK Children.

Calo, R., A, M. F., & Kerr, I. (2016). *Robot Law.* Cheltenham, UK: edward Elgar Publishing Limited.

Čapek, K. (1921). *R.U.R.*

Cengiz, K. (2008). *Fuzzy Multi-Criteria Decision Making.* Turkey: Springer Science. doi:https://doi.org/10.1007/978-0-387-76813-7

Chaghooshi, A. J., Fathi, M. R., & Kashef, M. (2012). Integration of fuzzy Shannon's entropy with fuzzy TOPSIS for industrial robotic system section. *Journal of Industrial Engineering and Management, 5*(1), 102-114.

Chatterjee, P., Athawale, V. M., & Chakraborty, S. (Outubro de 2010). Selection of industrial robots using compromise ranking and outranking methods. *Robotics*

and Computer-Integrated Manufacturing, 26(5), 483–489. doi:https://doi.org/10.1016/j.rcim.2010.03.007

Chaves, M. C., Júnior, S. F., Pereira, E. R., & de Mello, J. C. (26 de Março de 2010). Utilização do método ELECTRE II para avaliação de pilotos no campeonato de Fórmula 1. *Produção, 20*(1), 102-113. doi:http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132010005000012

Cherubini, A., Passama, R., Crosnier, A., Lasnier, A., & Fraisse, P. (2016). Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 40*, 1-13.

Cherubini, A., Passama, R., Crosnier, A., Lasnier, A., & Fraisse, P. (Agosto de 2016). Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 40*, 1-13. doi:https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.12.007

Chu, T.-C., & Lin, Y.-C. (Fevereiro de 2003). A Fuzzy TOPSIS Method for Robot Selection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 21*(4), 284–290. doi:https://doi.org/10.1007/s001700300033

Colgate, J. E., & Peshkim, M. (14 de Setembro de 1999). *United States of America Patente Nº 5,952,796.* Fonte: https://patentimages.storage.googleapis.com/8f/92/55/78f01440703315/US5952796.pdf

COMAU. (2018). *Collaborative Robots Aura*. Acesso em 13 de 11 de 2018, disponível em COMAU: https://www.comau.com/EN/our-competences/robotics/automation-products/CollaborativeRobotsAura

Craig, J. J. (1986). *Introduction to Robotics.* Addison.

Csillag, J. M. (1995). *Análise do Valor* (Vol. 4). São Paulo: atlas.

Devi, K. (Outubro de 2011). Extension of VIKOR method in intuitionistic fuzzy environment for robot selection. *Expert Systems with Applications, 38*(11), 14163-14168. doi:https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.227

FANUC. (2018). *M-900 Series*. Acesso em 13 de 11 de 2018, disponível em FANUC: https://www.FANUC.eu/bg/en/robots/robot-filter-page/m-900-series

Figueira, J., Greco, S., & Ehrgott, M. (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys.* New York: Springer Science & Business Media.

Forbes. (13 de Setembro de 2018). *Universal Robots Just Sold Their 25,000th Collaborative Robot*. Fonte: forbes:

https://www.forbes.com/sites/charlestowersclark/2018/09/13/universal-robots-just-sold-their-25000th-collaborative-robot/#db2bbfb2eeb1

Goh, C.-h. (1997). Analytic Hierarchy Process for Robot Selection. *Journal of Manufacturing Sustems, 16*, 381-386. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612597884671

Goicoechea, A., Hansen, D. K., & Duckstein, L. (1982). *Multiobjective Decision Analysis With Engineering and Business Applications.* New York: john Wiley & Sons Inc. doi:https://doi.org/10.1029/EO064i031p00486-02

Gomes, L. F., & Gomes, C. F. (2004). *GOMES, Luiz F. A. M. & GOMES, Carlos F. S. Tomada de Decisão Gerencial: enfoque multicritério.* São Paulo: atlas.

Governo do Brasil. (2019). *NR-12 - SEGURANÇA NO TRABALHO EM MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS*. Fonte: gOV.BR: http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR12/NR-12.pdf

Hewson, G. (15 de Março de 2013). Autonomous vehicle for material handling. *Advanced Manufacturing Technology*, p2. Fonte: http://go-galegroup.ez433.periodicos.capes.gov.br/ps/i.do?&id=GALE|A337816630&v=2.1&u=capes&it=r&p=AONE&sw=w

Hospinet. (2018 de Outubro de 2018). *Cadeira de Rodas Motorizada Ottobock B-400.* Fonte: Hospinet: https://www.hospinet.com.br/cadeira-de-rodas-motorizada-ottobock-b-400/p

Houghton Mifflin. (1969). *The American Heritage Dictionary of the English Language.* Houghton Mifflin Harcourt.

Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: methods and applications.* Berlin: Springer-Verlag. doi:http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9

Iç, Y. T., Yurdakul, M., & Dengiz, B. (2013). Development of a decision support system for robot selection. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 142-157. doi:10.1016/j.rcim.2012.11.008

IFA. (2018). *Executive Summary World Robotics 2018 Industrial Robots.* Fonte: https://ifr.org/downloads/press2018/Executive_Summary_WR_2018_Industrial_Robots.pdf

iRobot. (28 de Outubro de 2018). *Robô Aspirador Roomba.* Fonte: iRobot: https://www.irobot.com.br/Robos-domesticos/Vacuum-cleaning

ISO. (07 de 2011). *ISO 10218: robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots — Part 1: robots*. Fonte: iso.org: https://www.iso.org/standard/51330.html

ISO. (02 de 2016). *ISO/TS 15066:2016 - Robots and robotic devices — Collaborative robots*. Fonte: iso.org: https://www.iso.org/standard/62996.html

ISO. (2018). *ISO - About Us*. (ISO) Acesso em 26 de 10 de 2018, disponível em ISO: https://www.iso.org/about-us.html

ISO-8373. (2012). *IFR - ISO*. Fonte: robos Industriais: https://ifr.org/industrial-robots

Kahraman, C., Çevik, S., Ates, N. Y., & Gülbay, M. (Maio de 2007). Fuzzy multi-criteria evaluation of industrial robotic systems. *Computers & Industrial Engineering, 52*(4), 414-433. doi:https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.01.005

Kapoor, V., & Tak, S. S. (July de 2005). Fuzzy Optim Decis Making. *Springer Science+Business Media, 4*(3), 209–234.

Karcher. (28 de Outubro de 2018). *Como tornar a limpeza industrial mais rápida e eficiente usando varredeiras industriais.* Fonte: karcher: https://www.karcher.com.br/br/dicas-karcher/como-tornar-a-limpeza-industrial-mais-rapida-e-eficiente-usando-varredeiras-industriais.html

Khouja, M., & Booth, D. E. (1995). Fuzzy grupoing procedure for evaluation and selection of industrial robots. *Journal of Manufacturing Systems, 14*(4), 244-251. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0278612595988779#!

Krohling, R. A., & de Souza, T. T. (2011). Dois Exemplos da Aplicação da Técnica TOPSIS para Tomada de Decisão. *Revista de Sistemas de Informação da FSMA, 8*, 31-35.

Kumar, R., & Garg, R. K. (Outubro de 2010). Optimal Selection of Robots by Using Distance Based Approach Method. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 26*(5), 500-506. doi:https://doi.org/10.1016/j.rcim.2010.03.012

Li, L. (2018). China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of “Made-in-China. *Technological Forecasting & Social Change, 135*, 66-74. doi:https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.028

Mareschal, B., & Brans, J. P. (1988). Geometrical representations for MCDA. *European Journal of Operational Research, 34*(1), 69-77. doi:https://doi.org/10.1016/0377-2217(88)90456-0

Mareschal, B., & Brans, J. P. (1992). Promethee V: Mcdm Problems With Segmentation Constraints. *INFOR: information Systems and Operational Research, 30*(2), 85-96.

Martín Ramos, J. M., García, D. L., Gómez-Bravo, F., & Morón, A. B. (May de 2010). Application of multicriteria decision-making techniques to manoeuvre planning in nonholonomic robots. *Expert Systems with Applications, 37*(5), 3962-3976. doi:https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.11.019

Matthias, B. (10 de 03 de 2014). Industrial Safety Requirements forCollaborative Robots and Applications. *ERF 2014 – Workshop: Workspace Safety inIndustrial Robotics: trends, integration and standard*s.

Maurice, P., Padois, V., Measson, Y., & Bidaud, P. (Janeiro de 2017). Human-oriented design of collaborative robots. *International Journal of Industrial Ergonomics, 57*, 88-102. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ergon.2016.11.011

Miller, G. A. (1956). The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on our Capacity for. *Psychological Review*, 81-97. Fonte: https://labs.la.utexas.edu/gilden/files/2016/04/MagicNumberSeven-Miller1956.pdf

Ministério da Fazenda, Instituto Nacional do Seguro Social, & Empresa de Tecnologia e Informações da Previdência. (2017). *Anuário Estatístico de Acidentes do Trabalho.* Fonte: http://sa.previdencia.gov.br/site/2018/09/AEAT-2017.pdf

Ministério Público do Trabalho, & Organização Internacional do Trabalho. (2018). *Observatório Digital de Saúde e Segurança do Trabalho: acidentes Registrados.* Fonte: https://observatoriosst.mpt.mp.br/

Mousseau, V., Slowinski, R., & Zielniewicz, P. (2018). *ELECTRE TRI 2.0a Methodological guide and User's manual.* Paris. Fonte: http://www.lamsade.dauphine.fr/mcda/biblio/PDF/mous3docl99.pdf

Özgürler, Ş., Güneri, A. F., Gülsün, B., & Yılmaz, O. (12-18 de September de 2011). ROBOT SELECTION FOR A FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM. *15th International Research/Expert Conference - Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, 333-336. Fonte: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.403.9360&rep=rep1&type=pdf

Parameshwaran, R., Kumar, S. P., & Saravanakumar, K. (January de 2015). An integrated fuzzy MCDM based approach for robot selection. *Applied Soft Computing, 26*, 31-41. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2014.09.025

Parkan, C., & Wu, M.-L. (Julho de 1999). Decision-making and performance measurement models with applications to robot selection. *Computers & Industrial Engineering, 36*(3), 503-523. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835299001461

Pazos, F. (2002). *Automação de Sistemas & Robótica.* Axcel Books do Brasil Ltda.

Prutz, S. (Julho de 2018). A cobot is about to become your co-worker. *Solutions Plant of the Future*, 40-41.

Rao, R. V., & Padmanabhan, K. (Agosto de 2006). Selection, identification and comparison of industrial robots using digraph and matrix methods. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 22*(4), 373-383. doi:https://doi.org/10.1016/j.rcim.2005.08.003

Rao, R. V., Patel, B. K., & Parnichkun, M. (Junho de 2011). Industrial robot selection using a novel decision making method considering objective and subjective preferences. *Robotics and Autonomous Systems, 59*(6), 367-375. doi:https://doi.org/10.1016/j.robot.2011.01.005

Robotics Institute of America. (1980). Robotics Today. *News*, 7.

ROBOTIQ. (2018). *Collaborative Robots in Global Companies.* Fonte: robotiq.

ROBOTIQ. (2018). *What is an Average Price for a Collaborative Robot ?* Acesso em 13 de 11 de 2018, disponível em ROBOTIQ: https://blog.robotiq.com/what-is-the-price-of-collaborative-robots

Rogers, M., & Bruen, M. (1998). Choosing realistic values of indifference, preference and veto thresholds for use with environmental criteria within ELECTRE. *European Journal of Operational Research, 107*(3), 542-551. doi:https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00175-6

Rogers, M., Bruen, M., & Maystre, L.-Y. (2000). *Electre and decision support.* New York: Kluwer Academic Publishers. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5057-7

Roy, B. (1978). ELECTRE III: algorithme de Classement Base Sur Une Représentation Floue des Préférences en Présence des Critères Multiples. *Cahiers du CERO, 20*(1), 3-24.

Roy, B. (1996). *Multicriteria Methodology for Decision Aiding* (1 ed.). London: Kluwer Academic Publishers. doi:10.1007/978-1-4757-2500-1

Roy, B., & Hugonnard, J. C. (Julho de 1982). Ranking of suburban line extension projects on the Paris metro system by a multicriteria method. *Transportation Research Part A General, 16*(4), 301-312. doi:https://doi.org/10.1016/0191-2607(82)90057-7

Saaty, T. L. (1987). The Analytic Hierarchy Process - What it is and How it is used. *Mathematical Modelling, 9*(3--5), 161-176. doi:https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences, 1*(1), 83-98. Fonte: http://www.rafikulislam.com/uploads/resourses/197245512559a37aadea6d.pdf

Saaty, T. L., & Katz, J. M. (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research, 48*, 9-26.

Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution.* Crown Business New York.

Seliger, G., & Stock, T. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *13th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Decoupling Growth from Resource Use.* doi: 10.1016/j.procir.2016.01.129

Sen, D. K., Datta, S., & Mahapatra, S. S. (2016). Extension of PROMETHEE for robot selection decision making Simultaneous exploration of objective data and subjective (fuzzy) data. *Benchmarking: an International Journal, 23*(4), 983-1014. doi:https://doi.org/10.1108/BIJ-08-2015-0081

Sen, D. K., Datta, S., Patel, S. K., & Mahapatra, S. S. (7 de April de 2015). Multi-criteria decision making towards selection of industrial robot. *Benchmarking: an International Journal, 22*(3), 465-487. doi:https://doi.org/10.1108/BIJ-05-2014-0046

Sen, D. K., Datta, S., Patel, S. K., & Mahapatra, S. S. (2015). Multi-criteria decision making towards selection of industrial robot: exploration of PROMETHEE II method. *Benchmarking: an International Journal, 22*(3), 465-487. doi:10.1108/BIJ-05-2014-0046

SICK. (20 de 08 de 2017). SEGURIDAD DE LOS ROBOTS COLABORATIVOS. *MITOS – REALIDADES – FUTURO*. Fonte: http://www.osalan.euskadi.eus/contenidos/informacion/ponencias_jt170720_cursoverano/es_def/adjuntos/ponencia_jt170720_otto_goernemann.pdf

Siqueira, G. B., & Filho, A. T. (15 a 18 de Agosto de 2011). Aplicação do Método Electre I para Seleção de Ideia. *XLIII Simpósio Brasileiro de PESQUISA OPERACIONAL*, pp. 3322-3332.

Skillicorn, D., Billingsley, R., & Williams, M.-A. (2018). The Design Space of Social Robots.

Taillandier, P., & Stinckwich, S. (19 de December de 2011). Using the PROMETHEE multi-criteria decision making method to define new exploration strategies for rescue robots. *IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*. doi:10.1109/SSRR.2011.6106747

Tao, L., Chen, Y., Liu, X., & Wang, X. (October de 2012). An integrated multiple criteria decision making model applying axiomatic fuzzy set theory. *Applied Mathematical Modelling, 36*(10), 5046-5058. doi:https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.12.042

Technical Committee ISO/TC184. (2012). ISO 8373 - Robots And Robotic Devices - Vocabulary.

The International Federation of Robotics. (2017). *One Market.* Frankfurt .

Tung, Y.-C. A., Cheng, C.-H., & Goh, C.-H. (Abril de 1996). A revised weighted sum decision model for robot selection. *Computers & Industrial Engineering, 30*(2), 193-199. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0360835295001670

TÜV NORD. (2015). TÜV Nord Certificate. Acesso em 12 de 11 de 2018, disponível em https://www.universal-robots.com/media/1528658/tuv-nord-certificate.pdf

TÜV SAAR. (2016). KUKA. *Certificate Safety LBR Iiwa Sunrise*. Acesso em 12 de 11 de 2018, disponível em KUKA: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/aee9813523c14f219db43209323bbd85/certificate-safety-lbr-iiwa-sunriseos-v110.pdf

TÜV SÜD. (2016). FANUC's CR-35iA. Acesso em 12 de 11 de 2018, disponível em https://www.tuv.com/en/cambodia/about_us_kh/news/newscontent-asia-kh_267207.html

Universal Robots. (2018). Collaborative robts benefits - why COBOTs? Find out about robot programming. Acesso em 2018, disponível em https://www.universal-robots.com/products/collaborative-robots-cobots-benefits/

Universal Robots. (2018). *Como a Universal Robots vendeu o primeiro COBOT*. Acesso em 10 de 11 de 2018, disponível em universal-robots:

https://www.universal-robots.com/pt/sobre-a-universal-robots/central-de-not%C3%ADcias/hist%C3%B3ria-dos-cobots/

Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mousavi, S. M., & Ghodratnama, A. (January de 2013). Soft computing based on new interval-valued fuzzy modified multi-criteria decision-making method. *Applied Soft Computing, 13*(1), 165-172. doi:https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.08.020

Velasquez, M., & Hester, P. T. (2013). An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods. *International Journal of Operations Research, 10*(2), 56-66.

Visti, T. (2018). Editorial WR 2018 Industrial Robots. Em T. I. Robotic. Fonte: international Federation of Robotics: https://ifr.org/downloads/press2018/Editorial_WR_Service_Robots_2018.pdf

Zhao, L., Tsujimura, Y., & Gen, M. (Dezembro de 1996). Genetic algorithm for robot selection and work station assignment problem. *Computers & Industrial Engineering, 31*(3–4), 599-602. Fonte: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835296002938

APÊNDICE A – CATÁLOGO DE ROBÔS INDUSTRIAIS

Fabricante	Nome do Robô	Graus de Liberdade	Payload KG	Peso KG	Repetibilidade mm	Alcance mm	Ciclo (1Kg 25x300x25mm)	Vel. Rot Eixo 1 (º/s)	Vel. Rot Eixo 2	Vel. Rot Eixo 3	Vel. Rot Eixo 4	Vel. Rot Eixo 5	Vel. Rot Eixo 6	Vel. Rot Eixo 7	Facilidade de Prog.	Segurança	Colaborativo?
ABB	YUMI	14	0,5	38	0,02	559	0,86	180	180	180	400	400	400	n/a	8	PL b	Sim
ABB	Single-arm YuMi	7	0,5	38	0,02	559	0,86	180	180	180	400	400	400	n/a	8	PL d	
AUBO	I5	7	5	24	0,05	880	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	8	PL d	Sim
BOSCH	APAS ASSISTANT	6	4	230	0,03	911	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	5		Sim
COMAU	AURA	6	110	685	0,07	2210	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	6		Sim
FANUC	CR 35iA	6	35	990	0,08	1813	n/a	750	750	750	750	750	750	n/a	2		Sim
FANUC	CR 15iA	6	15	255	0,02	1441	n/a	1500	1500	1500	1500	1500	1500	n/a	n/a		Sim
FANUC	CR 14iA/L	6	14	55	0,01	911	n/a	500	500	500	500	500	500	n/a	n/a		Sim
FANUC	CR 7iA/L	6	7	55	0,03	911	n/a	1000	1000	1000	1000	1000	1000	n/a	2		Sim
FANUC	CR 7iA	6	7	53	0,02	717	n/a	1000	1000	1000	1000	1000	1000	n/a	2		Sim
FANUC	CR 4iA	6	4	48	0,01	550	n/a	1000	1000	1000	1000	1000	1000	n/a	2		Sim
F&P PERSONAL ROBOTICS	PROB 2R 24V	6	3	20	0,1	775	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	9		Sim
F&P PERSONAL ROBOTICS	PROB 2R 48V	6	3	20	0,1	775	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	9		Sim
FRANKA	EMIKA	7	3	18,5	0,1	800	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	10	PL d	Sim
KAWADA INDUSTRIES	NEXTAGE	15	3	29	0,03	577	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	4		Sim
KAWASAKI	DUARO1 WD002N	15	4	200	0,05	760	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	4		Sim
KUKA	LBR IIWA 7 R800	7	7	22	0,1	800	n/a	170	120	170	120	170	120	175	9	PL d	Sim
KUKA	LBR IIWA 14 R820	7	14	30	0,15	820	n/a	170	120	170	120	170	120	175	9	PL d	Sim
LIFE ROBOTICS	CORO	6	2	26	1	865	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a		Sim
MABI	SPEEDY 6	6	6	28	0,1	800	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	5		Sim
MABI	SPEEDY 12	6	12	35	0,1	1250	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	5		Sim
YASKAWA	HC10	6	10	47	0,1	1200	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	8	PL d	Sim
MRK SYSTEM	KR 5 SI	6	5	150	0,04	1423	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	5		Sim
PRECISE AUTOMATION	PAVP6	6	2,5	28	0,02	432	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	PL d	Sim
PRECISE AUTOMATION	PF400	4	1	20	0,05	576	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	PL d	Sim
PRECISE AUTOMATION	PP100	4	2	20	0,1	1270	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	PL d	Sim
PRECISE AUTOMATION	OB7	7	5	24	0,1	1000	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	9		Sim
RETHINK ROBOTICS	SAWYER	7	4	19	0,1	1260	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	9	PL d	Sim
RETHINK ROBOTICS	BAXTER	7	4	19	0,1	1260	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	9	PL d	Sim
STÄUBLI	TX2-60	6	3,5	51,4	0,02	670	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	2	PL e	Sim
STÄUBLI	TX2-60L	6	2	52,5	0,03	920	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	2	PL e	Sim
STÄUBLI	TX2-90	6	7	114	0,02	1000	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	2	PL e	Sim
STÄUBLI	TX2-90L	6	6	117	0,02	1200	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	2	PL e	Sim
STÄUBLI	TX2-90XL	6	5	119	0,02	1450	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	2	PL e	Sim
TECHMAN	TM5-700	6	6	22	0,05	700	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a		Sim
TECHMAN	TM5-700	6	4	22,2	0,05	920	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a		Sim
UNIVERSAL ROBOTS	UR3	6	3	11	0,1	500	n/a	180	180	180	360	360	360	n/a	8	PL d	Sim
UNIVERSAL ROBOTS	UR5	6	5	18,4	0,1	850	n/a	180	180	180	180	180	180	n/a	8	PL d	Sim
UNIVERSAL ROBOTS	UR10	6	10	28,9	0,1	1300	1	120	120	180	180	180	180	n/a	8	PL d	Sim
ABB	IRB 120	6	3	25	0,01	580	0,92	250	250	250	320	320	420	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 1200-7	6	7	52	0,02	700	0,42	288	240	300	400	405	600	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 1200-9	6	5	54	0,02	900	0,42	288	240	300	400	405	600	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 140	6	6	98	0,03	810	0,85	200	200	260	360	360	450	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 140T	6	6	98	0,03	810	0,77	250	250	260	360	360	450	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 1410	6	5	225	0,02	1444	2.1 M/S	120	120	120	280	280	280	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 2400/10	6	10	380	0,03	1550	n/a	150	150	150	360	360	450	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 2400/16	6	16	380	0,03	1550	n/a	150	150	150	360	360	450	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 2600ID-15/1.85	6	15	273	0,026	1850	n/a	175	175	175	360	360	500	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 2600ID-8/2.00	6	8	276	0,023	2000	n/a	175	175	175	360	360	500	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 4400/60	6	60	1040	0,06	1955	n/a	150	120	120	225	250	330	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 4400/L10	6	10	1040	0,05	2547	n/a	150	150	150	370	330	381	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 4600-60/2.05	9	60	425	0,06	1727	n/a	175	175	175	250	250	360	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 4600-45/2.05	9	45	425	0,05	1727	n/a	175	175	175	250	250	360	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 4600-40/2.55	9	40	435	0,06	1922	n/a	175	175	175	250	250	360	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 4600-20/2.50	9	20	412	0,05	1922	n/a	175	175	175	360	360	500	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 6620	6	150	900	0,05	2204	n/a	100	90	90	150	120	190	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 6640-235/2.55	6	235	1310	0,05	2550	n/a	100	90	90	170	120	190	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 6640-185/2.8	6	185	1405	0,05	2800	n/a	100	90	90	170	120	190	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 6650S-90/3.9	6	90	2275	0,15	3900	n/a	100	90	90	150	120	235	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 6650S-125/3.5	6	125	2250	0,15	3500	n/a	100	90	90	150	120	235	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 6650S-200/3.0	6	200	2250	0,15	3000	n/a	100	90	90	150	120	235	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 6660-100/3.3	6	100	1950	0,1	3350	n/a	110	130	130	150	120	240	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 6660-130/3.1	6	130	1910	0,15	3100	n/a	110	130	123	150	120	240	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 6660-205/1.9	6	205	1730	0,1	1930	n/a	130	130	130	150	120	190	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 6700-200/2.60	6	200	1250	0,05	2600	n/a	110	110	110	190	150	210	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 6700-155/2.85	6	155	1260	0,1	2850	n/a	110	110	110	190	150	210	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 6700-235/2.65	6	235	1205	0,05	2650	n/a	100	90	90	170	120	190	n/a	n/a		Não
ABB	IRB 6700-205/2.80	6	205	1270	0,05	2800	n/a	100	90	90	170	120	190	n/a	n/a		Não

ABB	IRB 6700-175/3.05	6	175	1220	0,05	3050	n/a	100	90	90	170	120	190	n/a	n/a	Não
ABB	IRB 6700-150/3.20	6	150	1280	0,1	3200	n/a	100	90	90	170	120	190	n/a	n/a	Não
ABB	IRB 6700-300/2.70	6	300	1525	0,1	2700	n/a	100	88	90	140	110	180	n/a	n/a	Não
ABB	IRB 6700-245/3.00	6	245	1540	0,05	3000	n/a	100	88	90	140	110	180	n/a	n/a	Não
ABB	IRB 6700Inv -300/2.60	6	300	1690	0,05	2600	n/a	100	88	90	140	110	180	n/a	n/a	Não
ABB	IRB 6700Inv -245/2.90	6	245	1705	0,1	2900	n/a	100	88	90	140	110	180	n/a	n/a	Não
ABB	IRB 760	4	450	2310	0,05	3180	n/a	85	85	85	160	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
ABB	IRB 7600-500/2.55	6	500	2400	0,1	2550	n/a	75	50	55	100	100	160	n/a	n/a	Não
ABB	IRB 7600-400/2.55	6	400	2400	0,3	2550	n/a	75	60	60	100	100	160	n/a	n/a	Não
ABB	IRB 7600-340/2.80	6	340	2425	0,3	2800	n/a	75	60	60	100	100	160	n/a	n/a	Não
ABB	IRB 7600-325/3.10	6	325	2440	0,1	3100	n/a	100	60	60	100	100	190	n/a	n/a	Não
ABB	IRB 7600-150/3.50	6	150	2450	0,2	3500	n/a	75	50	55	100	100	160	n/a	n/a	Não
ABB	IRB 8700-800/3.50	6	800	4525	0,1	3500	n/a	75	60	60	85	85	115	n/a	n/a	Não
ABB	IRB 8700-550/4.20	6	550	4575	0,05	4200	n/a	75	60	60	85	85	115	n/a	n/a	Não
FANUC	LR Mate 200 4SH	5	4	19	0,013	550	n/a	460	460	520	560	1800	n/a	n/a	n/a	Não
FANUC	LR Mate 200 4S	6	4	20	0,01	550	n/a	460	460	520	560	560	900	n/a	n/a	Não
FANUC	LR Mate 200 4SC	6	4	20	0,013	550	n/a	460	460	520	560	560	900	n/a	n/a	Não
FANUC	LR Mate 200 7H	5	7	24	0,018	717	n/a	450	380	520	545	1500	n/a	n/a	n/a	Não
FANUC	LR Mate 200 7C	6	7	25	0,018	717	n/a	450	380	520	550	545	1000	n/a	n/a	Não
FANUC	LR Mate 200 7WP	6	7	25	0,018	717	n/a	450	380	520	550	545	1000	n/a	n/a	Não
FANUC	LR Mate 200	6	7	25	0,01	717	n/a	450	380	520	550	545	1000	n/a	n/a	Não
FANUC	LR Mate 200 7L	6	7	27	0,01	911	n/a	370	310	410	550	545	1000	n/a	n/a	Não
FANUC	LR Mate 200 7LC	6	7	27	0,018	911	n/a	370	310	410	550	545	1000	n/a	n/a	Não
FANUC	LR Mate 200 14L	6	14	27	0,01	911	n/a	120	61	58	400	240	400	n/a	n/a	Não
FANUC	M-10 iA 7L	6	7	135	0,03	1633	n/a	230	225	230	430	430	630	n/a	n/a	Não
FANUC	M-10 iA 8L	6	8	150	0,04	2028	n/a	200	200	210	430	430	630	n/a	n/a	Não
FANUC	M-10 iD 8L	6	8	180	0,03	2032	n/a	210	210	220	430	450	720	n/a	n/a	Não
FANUC	M-10 iA 10MS	6	10	130	0,03	1101	n/a	260	280	315	420	420	720	n/a	n/a	Não
FANUC	M-10 iA 10M	6	10	130	0,03	1422	n/a	225	205	225	450	450	700	n/a	n/a	Não
FANUC	M-10 iD 10L	6	10	150	0,03	1636	n/a	260	240	260	430	450	720	n/a	n/a	Não
FANUC	M-10 iA 12S	6	12	130	0,03	1098	n/a	260	280	315	430	430	630	n/a	n/a	Não
FANUC	M-10 iA 12S	6	12	130	0,03	1420	n/a	230	225	230	430	430	630	n/a	n/a	Não
FANUC	M-10 iD 12	6	12	145	0,02	1441	n/a	260	240	260	430	450	720	n/a	n/a	Não
FANUC	M-20 iA 12L	6	12	250	0,03	2009	n/a	200	175	190	430	430	630	n/a	n/a	Não
FANUC	M-20 iD 12L	6	12	250	0,03	2272	n/a	210	210	265	420	450	720	n/a	n/a	Não
FANUC	M-20 iA 20T	6	20	185	0,04	1662	n/a	200	175	180	360	360	550	n/a	n/a	Não
FANUC	M-20 iA	6	20	250	0,03	1811	n/a	195	175	180	360	360	550	n/a	n/a	Não
FANUC	M-20 iA 20M	6	20	250	0,03	1813	n/a	195	175	180	405	405	615	n/a	n/a	Não
FANUC	M-20 iB 25	6	25	210	0,02	1853	n/a	205	205	260	415	415	880	n/a	n/a	Não
FANUC	M-20 iD 25	6	25	250	0,02	1831	n/a	210	210	265	420	420	720	n/a	n/a	Não
FANUC	M-20 iB 25C	6	25	210	0,023	1853	n/a	205	205	260	415	415	880	n/a	n/a	Não
FANUC	M-20 iA 35M	6	35	252	0,03	1813	n/a	180	180	200	350	350	400	n/a	n/a	Não
FANUC	M-20 iB 35S	6	35	205	0,02	1445	n/a	205	205	260	415	415	880	n/a	n/a	Não
FANUC	M-410 iB 140H	5	140	1200	0,2	2850	n/a	140	115	135	135	420	n/a		n/a	Não
FANUC	M-410 iC 110	4	110	1030	0,5	2403	n/a	145	130	140	420	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
FANUC	M-410 iC 185	4	185	1600	0,5	3143	n/a	140	140	140	305	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
FANUC	M-410 iC 315	4	315	1600	0,5	3143	n/a	90	100	110	195	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
FANUC	M-410 iC 500	4	500	2410	0,5	3143	n/a	85	85	85	200	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
FANUC	M-410 iB 700	4	700	2700	0,5	3143	n/a	60	60	60	120	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
FANUC	M-710 iC 12L	6	12	540	0,09	3123	n/a	180	180	180	400	430	630	n/a	n/a	Não
FANUC	M-710 iC 20L	6	20	540	0,06	3110	n/a	175	175	180	350	360	600	n/a	n/a	Não
FANUC	M-710 iC 20M	6	20	530	0,06	2582	n/a	175	175	180	350	360	600	n/a	n/a	Não
FANUC	M-710 iC 45M	6	45	570	0,06	2606	n/a	180	180	180	250	250	360	n/a	n/a	Não
FANUC	M-710 iC 50S	6	50	545	0,04	1359	n/a	175	175	175	250	250	355	n/a	n/a	Não
FANUC	M-710 iC 50T	6	50	410	0,07	1900	n/a	175	175	175	250	250	355	n/a	n/a	Não
FANUC	M-710 iC 50H	5	50	540	0,15	2003	n/a	175	175	175	175	720	n/a	n/a	n/a	Não
FANUC	M-710 50	6	50	560	0,03	2050	n/a	175	175	175	250	250	355	n/a	n/a	Não
FANUC	M-710 50E	6	50	560	0,07	2050	n/a	175	175	175	250	240	340	n/a	n/a	Não
FANUC	M-710 70T	6	70	410	0,07	1900	n/a	175	120	120	225	225	225	n/a	n/a	Não
FANUC	M-710 70	6	70	560	0,04	2050	n/a	160	120	120	225	225	225	n/a	n/a	Não
FANUC	M-900 iB 280	6	280	1700	0,1	2655	n/a	110	105	100	110	110	180	n/a	n/a	Não
FANUC	M-900 iB 280L	6	280	1600	0,1	3103	n/a	110	105	100	125	125	205	n/a	n/a	Não
FANUC	M-900 iB 330L	6	330	1780	0,1	3203	n/a	100	85	85	90	85	165	n/a	n/a	Não
FANUC	M-900 iB 360	6	360	1540	0,1	2655	n/a	110	105	100	110	110	180	n/a	n/a	Não
FANUC	M-900 iB 400L	6	400	3150	0,1	3704	n/a	80	80	80	100	100	160	n/a	n/a	Não
FANUC	M-900 iB 700	6	700	2800	0,1	2832	n/a	80	80	80	100	100	160	n/a	n/a	Não
FANUC	M-2000 iA 900L	6	900	9600	0,27	4683	n/a	45	30	30	50	50	70	n/a	n/a	Não
FANUC	M-2000 iA 1200	6	1200	8600	0,18	3734	n/a	45	30	30	50	50	70	n/a	n/a	Não
FANUC	M-2000 iA 1700L	6	1700	12500	0,27	4683	n/a	20	14	14	18	18	40	n/a	n/a	Não
FANUC	M-2000 iA 2300	6	2300	11000	0,18	3734	n/a	20	14	14	18	18	40	n/a	n/a	Não
FANUC	R-1000 iA 80H	5	80	610	0,03	2230	n/a	185	180	180	180	500	n/a	n/a	n/a	Não
FANUC	R-1000 iA 80F	6	80	620	0,03	2230	n/a	170	140	160	230	230	350	n/a	n/a	Não
FANUC	R-1000 iA 100F	6	100	665	0,03	2230	n/a	130	110	120	170	170	250	n/a	n/a	Não
FANUC	R-1000 iA 120F-7B	7	120	790	0,03	2230	n/a	130	110	120	170	170	250	130	n/a	Não
FANUC	R-1000 iA 130F	6	130	675	0,03	2230	n/a	130	110	120	170	170	250	n/a	n/a	Não
FANUC	R-2000 iC 100P	6	100	1470	0,05	3540	n/a	120	100	115	140	140	210	n/a	n/a	Não
FANUC	R-2000 iC 125L	6	125	1115	0,05	3100	n/a	130	115	125	180	180	260	n/a	n/a	Não
FANUC	R-2000iC 165F	6	165	1090	0,05	2655	n/a	130	115	125	180	180	260	n/a	n/a	Não
FANUC	R-2000 iD 165FH	6	165	1130	0,05	2605	n/a	130	110	115	175	170	280	n/a	n/a	Não
FANUC	R-2000 iC 165R	6	165	1370	0,05	3095	n/a	115	110	125	180	180	260	n/a	n/a	Não
FANUC	R-2000 iC 210F	6	210	1090	0,05	2655	n/a	120	105	110	140	140	220	n/a	n/a	Não
FANUC	R-2000 iD 210FH	6	210	1130	0,05	2605	n/a	120	90	100	10	130	220	n/a	n/a	Não
FANUC	R-2000 iC 210L	6	210	1350	0,05	3100	n/a	105	90	85	120	120	200	n/a	n/a	Não
FANUC	R-2000 iC 210WE	6	210	1180	0,1	2450	n/a	95	85	95	120	120	190	n/a	n/a	Não
FANUC	R-2000 iC 210R	6	210	1370	0,05	3095	n/a	105	100	110	140	140	220	n/a	n/a	Não
FANUC	R-2000 iC 220U	6	220	1020	0,05	2518	n/a	120	85	110	140	140	220	n/a	n/a	Não

FANUC	R-2000 iC 270F	6	270	1320	0,05	2655	n/a	105	90	85	120	120	200	n/a	n/a	Não
FANUC	R-2000 iC 270R	6	270	1590	0,05	3095	n/a	105	85	85	120	120	200	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 10 R1420 HP	6	10	160	0,04	1420	n/a	220	210	270	381	311	492	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 10 R1420	6	10	160	0,04	1420	n/a	220	210	270	381	311	492	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 8 R1620 HP	6	8	165	0,04	1620	n/a	220	210	270	381	311	492	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 8 R1620	6	8	165	0,04	1620	n/a	220	210	270	381	311	492	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 6 R1820 HP	6	6	168	0,04	1820	n/a	220	210	270	381	311	492	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 6 R1820	6	6	168	0,04	1820	n/a	220	210	270	381	311	492	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 10 R1100 WP	6	10	56	0,03	1101	140	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 10 R1100 HM-SC	6	10	64	0,03	1101	132	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 10 R1100 CR	6	10	55	0,03	1101	140	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 10 R900 WP	6	10	53	0,03	901,5	141	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 10 R900 HM-SC	6	10	62	0,03	901,5	132	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 10 R900 CR	6	10	52	0,03	901,5	141	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 10 R1100-2	6	11,1	55	0,02	1101	140	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 6 R900 WP	6	6	53	0,03	901,5	150	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 6 R900 HM-SC	6	6	62	0,03	901,5	144	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 6 R900 EX	6	6	53	0,03	901,5	150	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 6 R900 CR	6	6	52	0,03	901,5	150	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 6 R700 WP	6	6	51	0,03	706,7	138	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 6 R700 HM-SC	6	6	60	0,03	706,7	132	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 6 R700 CR	6	6	50	0,03	706,7	138	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 6 R900-2	6	6,7	55	0,02	901	150	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 6 R700-2	6	6,8	53	0,02	726	138	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 3 R540	6	3	26,5	0,02	541	167	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 120 R3100-2	6	210	1105	0,05	3100	n/a	120	115	120	190	180	260	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 120 R2700-2	6	167	1069	0,05	2701	n/a	120	115	120	190	180	260	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 30-3	6	30	665	0,06	2033	n/a	140	126	140	260	245	322	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 60-3	6	60	665	0,06	2033	n/a	128	102	128	260	245	322	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 60-3 L45-3	6	45	671	0,06	2230	n/a	128	102	128	260	245	322	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 60-3 L30-3	6	30	679	0,06	2429	n/a	128	102	128	260	245	322	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 30 L16-2	6	16	700	0,07	3102	n/a	100	80	80	230	165	249	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 30-3 HA	6	30	665	0,05	2033	n/a	140	126	140	260	245	322	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 60-3 HA	6	95	665	0,05	2033	n/a	128	102	128	260	245	322	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 60 L45-3 HA	6	80	671	0,05	2230	n/a	128	102	128	260	245	322	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 60 L30-3 HA	6	65	679	0,05	2429	n/a	128	102	128	260	245	322	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 30-4 KS	6	30	600	0,06	2233	n/a	140	137	166	260	245	322	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 60-4 KS	6	95	600	0,06	2233	n/a	138	130	166	260	245	322	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 60 L45-4 KS	6	80	610	0,06	2430	n/a	138	130	166	260	245	322	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 60 L30-4 KS	6	65	615	0,06	2628	n/a	138	130	166	260	245	322	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 60 L16-2 KS	6	16	650	0,06	2952	n/a	103	88	81	230	165	249	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 150 R2700-2	6	150	1072	0,05	2701	n/a	120	115	120	190	180	260	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 180 R2900-2 F	6	180	1105	0,05	2900	n/a	105	107	114	179	172	219	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 210 R2700-2	6	210	1077	0,05	2701	n/a	120	115	112	179	172	220	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 210 R3100-2 F	6	210	1134	0,05	3100	n/a	105	94	100	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 240 R2900-2 C	6	240	1125	0,05	2900	n/a	103	94	100	170	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 300 R2700-2	6	300	1101	0,05	2701	n/a	105	101	107	140	113	180	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 100 R3500 press	6	100	1240	0,06	3501	n/a	136	137	114	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 100 R3500 press C	6	100	1240	0,06	3501	n/a	136	137	14	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 120 R3500 press C	6	120	1240	0,06	3455	n/a	136	137	114	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 120 R3500 press	6	120	1240	0,06	3501	n/a	136	137	114	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 90 R3700 prime K	6	90	1204	0,06	3701	n/a	105	107	114	292	258	284	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 120 R3500 prime K	6	120	1192	0,06	3501	n/a	105	107	114	292	258	284	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 150 R3100 prime	6	150	1114	0,06	3095	n/a	105	107	114	179	172	219	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 150 R3300 prime K	6	150	1184	0,06	3301	n/a	105	107	114	179	172	219	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 180 R2900 prime	6	180	1106	0,06	2896	n/a	105	107	114	179	172	219	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 180 R3100 prime K	6	180	1168	0,06	3101	n/a	105	107	114	179	172	219	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 210 R2700 prime C	6	210	1111	0,06	2556	n/a	105	107	114	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 210 R2700 prime	6	210	1111	0,06	2696	n/a	105	107	114	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 210 R2700 prime C-F	6	210	1111	0,06	2556	n/a	105	107	114	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 210 R2700 prime CR	6	210	1116	0,06	2696	n/a	105	107	114	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 210 R2700 prime F	6	210	1111	0,06	2696	n/a	105	107	114	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 210 R2900 prime K	6	210	1180	0,06	2901	n/a	105	107	114	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 240 R2500 prime	6	240	1102	0,06	2496	n/a	105	107	114	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 240 R2700 prime	6	240	1111	0,06	2696	n/a	105	107	107	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 240 R3330	6	240	2421	0,08	3326	n/a	100	90	90	120	110	160	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 240 R3330 C	6	240	2421	0,08	3326	n/a	100	90	90	120	110	160	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 240 R3330 F	6	240	2421	0,08	3326	n/a	100	90	90	120	110	160	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 280 R3080	6	280	2415	0,08	3076	n/a	100	90	90	120	110	160	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 280 R3080 F	6	280	2415	0,08	3076	n/a	100	90	90	120	110	160	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 360 R2830	6	360	2385	0,08	2826	n/a	100	90	90	120	110	160	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 360 R2830 C	6	360	2385	0,08	2826	n/a	100	90	90	120	110	160	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 360 R2830 C-F	6	360	2385	0,08	2826	n/a	100	90	90	120	110	160	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 360 R2830 F	6	360	2385	0,08	2826	n/a	100	90	90	120	110	160	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 340 R3330	6	340	2421	0,08	3326	n/a	90	80	75	90	83	130	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 340 R3330 F	6	340	2421	0,08	3326	n/a	90	80	75	90	83	130	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 420 R3080	6	420	2415	0,08	3076	n/a	90	80	75	90	83	130	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 420 R3080 F	6	420	2415	0,08	3076	n/a	90	80	75	90	83	130	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 480 R3330 MT	6	480	2475	0,08	3326	n/a	45	45	45	90	83	130	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 480 R3330 MT-F	6	480	2475	0,08	3326	n/a	45	45	45	90	83	130	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 500 R2830 C	6	500	2385	0,08	2485	n/a	90	80	75	90	83	130	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 500 R2830	6	500	2385	0,08	2826	n/a	90	80	75	90	83	130	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 500 R2830 MT	6	500	2440	0,08	2826	n/a	45	45	45	90	83	130	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 500 R2830 C-F	6	500	2385	0,08	2485	n/a	90	80	75	90	83	130	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 500 R2830 F	6	500	2385	0,08	2826	n/a	90	80	75	90	83	130	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 500 R2830 MT-F	6	500	2440	0,08	2826	n/a	45	45	45	90	83	130	n/a	n/a	Não

KUKA	KR 420 R3330	6	420	2686	0,08	3326	n/a	80	75	70	70	70	110	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 420 R3330 F	6	420	2686	0,08	3326	n/a	80	75	70	70	70	110	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 510 R3080	6	510	2680	0,08	3076	n/a	80	75	70	70	70	110	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 510 R3080 F	6	510	2680	0,08	3076	n/a	80	75	70	70	70	110	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 600 R2830	6	600	2650	0,08	2826	n/a	80	75	70	70	70	110	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 600 R2830 F	6	600	2650	0,08	2826	n/a	80	75	70	70	70	110	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 120 R3900 ultra K	6	120	1221	0,08	3901	n/a	105	101	107	292	258	284	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 120 R3900 ultra K-F-HP	6	120	1221	0,06	3901	n/a	105	101	107	292	258	284	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 150 R3700 ultra K	6	150	1215	0,06	3701	n/a	105	101	107	179	172	219	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 150 R3700 ultra K-F-HP	6	150	1215	0,06	3701	n/a	105	101	107	179	172	219	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 180 R3500 ultra K	6	180	1201	0,06	3501	n/a	105	101	107	179	172	219	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 180 R3500 ultra K-F-HP	6	180	1201	0,06	3501	n/a	105	101	107	179	172	219	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 210 R3100 ultra C	6	210	1154	0,06	3027	n/a	105	101	107	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 210 R3100 ultra	6	210	1154	0,06	3095	n/a	105	101	107	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 210 R3100 ultra C-F	6	210	1154	0,06	3027	n/a	105	101	107	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 240 R2900 ultra F	6	240	1145	0,06	2896	n/a	105	101	107	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 210 R3300 ultra K	6	210	1214	0,06	3301	n/a	105	101	107	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 210 R3300 ultra K-F	6	210	1214	0,06	3301	n/a	105	101	107	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 240 R2900 ultra C	6	240	1145	0,06	2819	n/a	105	101	107	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 240 R2900 ultra	6	240	1145	0,06	2896	n/a	105	101	107	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 240 R2900 ultra C-F	6	240	1145	0,06	2819	n/a	105	101	107	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 240 R3100 ultra K	6	240	1198	0,06	3101	n/a	105	101	107	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 240 R3100 ultra K-F	6	240	1198	0,06	3101	n/a	105	101	107	136	129	206	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 270 R2700 ultra C	6	270	1129	0,06	2662	n/a	105	101	107	122	113	175	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 270 R2700 ultra	6	270	1129	0,06	2696	n/a	105	101	107	122	113	175	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 270 R2700 ultra C-F	6	270	1129	0,06	2662	n/a	105	101	107	122	113	175	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 270 R2700 ultra F	6	270	1129	0,06	2696	n/a	105	101	107	122	113	175	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 270 R2900 ultra K	6	270	1189	0,06	2901	n/a	105	101	107	122	113	175	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 270 R3100 ultra K	6	270	1198	0,06	3101	n/a	105	101	107	122	113	175	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 270 R2900 ultra K-F	6	270	1189	0,06	2901	n/a	105	101	107	122	113	175	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 270 R3100 ultra K-F	6	270	1198	0,06	3101	n/a	105	101	107	122	113	175	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 300 R2500 ultra C	6	300	1120	0,06	2467	n/a	105	101	107	122	113	175	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 300 R2500 ultra	6	300	1120	0,06	2496	n/a	105	101	107	122	113	175	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 300 R2500 ultra C-F	6	300	1120	0,06	2467	n/a	105	101	107	122	113	175	n/a	n/a	Não
KUKA	KR 300 R2500 ultra F	6	300	1120	0,06	2496	n/a	105	101	107	122	113	175	n/a	n/a	Não

APÊNDICE B – CASO EXPERIMENTAL I

Fabricante	Nome do Robô	Graus de Liberdade	Payload KG	Peso KG	Repetibilidade mm	Alcance mm	Ciclo (1Kg 25x300x25mm)	Vel. Rot Eixo 1 (º/s)	Vel. Rot Eixo 2	Vel. Rot Eixo 3	Vel. Rot Eixo 4	Vel. Rot Eixo 5	Vel. Rot Eixo 6	Vel. Rot Eixo 7	Facilidade de Prog.	Segurança	Colaborativo?
ABB	YUMI	14	0,5	38	0,02	559	0,86	180	180	180	400	400	400	n/a	8	PL b	Sim
FANUC	CR 35iA	6	35	990	0,08	1813	n/a	750	750	750	750	750	750	n/a	2		Sim
FANUC	CR 15iA	6	15	255	0,02	1441	n/a	1500	1500	1500	1500	1500	1500	n/a	n/a		Sim
FANUC	CR 14iA/L	6	14	55	0,01	911	n/a	500	500	500	500	500	500	n/a	n/a		Sim
FANUC	CR 7iA/L	6	7	55	0,03	911	n/a	1000	1000	1000	1000	1000	1000	n/a	2		Sim
FANUC	CR 7iA	6	7	53	0,02	717	n/a	1000	1000	1000	1000	1000	1000	n/a	2		Sim
FANUC	CR 4iA	6	4	48	0,01	550	n/a	1000	1000	1000	1000	1000	1000	n/a	2		Sim
KUKA	LBR IIWA 7 R800	7	7	22	0,1	800	n/a	170	120	170	120	170	120	175	9	PL d	Sim
KUKA	LBR IIWA 14 R820	7	14	30	0,15	820	n/a	170	120	170	120	170	120	175	9	PL d	Sim
UNIVERSAL ROBOTS	UR3	6	3	11	0,1	500	n/a	180	180	180	360	360	360	n/a	8	PL d	Sim
UNIVERSAL ROBOTS	UR5	6	5	18,4	0,1	850	n/a	180	180	180	180	180	180	n/a	8	PL d	Sim
UNIVERSAL ROBOTS	UR10	6	10	28,9	0,1	1300	1	120	120	180	180	180	180	n/a	8	PL d	Sim

APÊNDICE C – CASO EXPERIMENTAL II

Fabricante	Nome do Robô	Graus de Liberdade	Payload KG	Peso KG	Repetibilidade mm	Alcance mm	Ciclo (1Kg 25x300x25mm)	Vel. Rot Eixo 1 (º/s)	Vel. Rot Eixo 2	Vel. Rot Eixo 3	Vel. Rot Eixo 4	Vel. Rot Eixo 5	Vel. Rot Eixo 6	Vel. Rot Eixo 7	Facilidade de Prog.	Segurança	Colaborativo?
FANUC	CR 15iA	6	15	255	0,02	1441	n/a	1500	1500	1500	1500	1500	1500	n/a	n/a		Sim
FANUC	CR 14iA/L	6	14	55	0,01	911	n/a	500	500	500	500	500	500	n/a	n/a		Sim
FANUC	CR 7iA/L	6	7	55	0,03	911	n/a	1000	1000	1000	1000	1000	1000	n/a	2		Sim
FANUC	CR 7iA	6	7	53	0,02	717	n/a	1000	1000	1000	1000	1000	1000	n/a	2		Sim
FANUC	CR 4iA	6	4	48	0,01	550	n/a	1000	1000	1000	1000	1000	1000	n/a	2		Sim
KUKA	LBR IIWA 7 R800	7	7	22	0,1	800	n/a	170	120	170	120	170	120	175	9	PL d	Sim
KUKA	LBR IIWA 14 R820	7	14	30	0,15	820	n/a	170	120	170	120	170	120	175	9	PL d	Sim
UNIVERSAL ROBOTS	UR3	6	3	11	0,1	500	n/a	180	180	180	360	360	360	n/a	8	PL d	Sim
UNIVERSAL ROBOTS	UR5	6	5	18,4	0,1	850	n/a	180	180	180	180	180	180	n/a	8	PL d	Sim
UNIVERSAL ROBOTS	UR10	6	10	28,9	0,1	1300	1	120	120	180	180	180	180	n/a	8	PL d	Sim