

MARCELO VILELA FIGUEIREDO

**Otimização multiobjetivo e delineamento de experimentos aplicados ao processo de
distribuição de ativos ortopédicos**

Guaratinguetá - SP
2022

Marcelo Vilela Figueiredo

Otimização multiobjetivo e delineamento de experimentos aplicados ao processo de distribuição de ativos ortopédicos

Tese apresentada ao Conselho de Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, na área de Gestão e Otimização.

Orientador: Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins

F475o	<p>Figueiredo, Marcelo Vilela</p> <p>Otimização multiobjetivo e delineamento de experimentos aplicados ao processo de distribuição de ativos ortopédicos / Marcelo Vilela Figueiredo – Guaratinguetá, 2022.</p> <p>68 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 64-68</p> <p>Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2022.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva</p> <p>Coorientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins</p> <p>1. Alocação de recursos. 2. Processo decisório. 3. Taguchi, Métodos (Controle de qualidade). I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 65.012.4(043)</p>
-------	--

MARCELO VILELA FIGUEIREDO

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. ANEIRSON FRANCISCO DA SILVA

Orientador - UNESP

participou por videoconferência



Prof. Dr. ANTÔNIO AUGUSTO CHAVES

UNIFESP

participou por videoconferência



Prof. Dr. ERICA XIMENES DIAS

Engenharia de Produção / USP

participou por videoconferência



Prof. Dr. MESSIAS BORGES SILVA

UNESP

participou por videoconferência



Prof. Dr. RAFAEL DE CARVALHO MIRANDA

UNIFEI

participou por videoconferência

SETEMBRO de 2022

DADOS CURRICULARES

MARCELO VILELA FIGUEIREDO

NASCIMENTO	23.06.1986 – Boa Esperança / MG
FILIAÇÃO	Mateus Vilela Figueiredo Analucia Vilela Figueiredo
2006/2010	Curso de Graduação em Engenharia de Produção Universidade Federal de Ouro Preto
2012/2013	Especialização em Gestão da Produção Universidade Estadual Paulista
2015/2017	Mestrado em Engenharia de Produção Universidade Estadual Paulista

Aos meus pais, Analucia e Mateus.
Aos meus irmãos, Márcia e Marcos.
À minha esposa, Luisa.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Analucia Vilela Figueiredo, pelo carinho, atenção, educação e dedicação, sempre presentes no meu dia a dia, sem os quais não me estabilizaria emocionalmente nos momentos mais difíceis da minha vida e Mateus Vilela Figueiredo, meu eterno exemplo de perseverança e honestidade, valores que tenho orgulho de ter adquirido plenamente por meio da convivência familiar.

Aos meus irmãos, Márcia e Marcos, meus melhores amigos, minha base de confiança e alegria com quem posso contar sempre com um forte apoio para qualquer problema que possa enfrentar.

À minha esposa Luisa pelo amor, carinho e dedicação, com os quais pude manter meu equilíbrio emocional frente ao grande desafio enfrentado.

Aos meus familiares, por sempre me acolherem com alegria e dedicação, ajudando-me, da melhor forma, em todos os momentos possíveis.

À toda a equipe da UNESP, por me incentivar e contribuir para o meu trabalho, fazendo parte desta conquista.

Ao orientador, professor Dr. Aneirson Francisco da Silva, por todo o apoio, ajuda e conhecimentos compartilhados em todas conversas e reuniões.

Ao professor Dr. Fernando Augusto Silva Marins, por todo o incentivo durante toda a minha jornada na UNESP.

À EY e aos colaboradores, por todas as oportunidades concedidas, nas quais pude colocar em prática tudo o que aprendi na teoria, bem como permitiram que eu conseguisse conciliar atividades profissionais e acadêmicas.

“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido. Não na vitória propriamente dita”

Mahatma Gandhi.

RESUMO

Alocação de recursos é um importante meio para se garantir uma boa produtividade ao negócio. Neste contexto, no ramo da medicina, em específico, para ferramentais cirúrgicos ortopédicos (FCs), tem-se um cenário relativamente complexo, que ocasiona cancelamentos e postergações de cirurgias por falta de FCs. Em virtude dos fatos citados, a presente tese foi desenvolvida, em uma empresa multinacional de grande porte, a qual atua na venda de próteses ortopédicas e empréstimos de sistemas cirúrgicos (SCs), que são compostos por FCs, para a realização das cirurgias. Trata-se de desenvolvimento de uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão, para alocar FCs em centros de distribuição (CDs), de forma a otimizar os objetivos de atendimento de demanda e geração de receita, que são conflitantes em algumas situações. Foi desenvolvido um modelo de Programação Matemática, para se determinar a demanda mensal de cirurgias a serem atendidas em cada CD, que culminam na alocação de FCs necessários para os atendimentos. Foi aplicada a metodologia Programação por Metas Ponderada (WGP), para modelar a função multiobjetivo, de forma a trabalhar com diferentes combinações de pesos dos objetivos, sendo os pesos definidos por meio da metodologia de Delineamento de Experimentos Taguchi, e avaliar os impactos nos resultados. Os resultados obtidos foram aderentes à realidade da empresa, culminando em maior eficiência e eficácia ao processo de alocação de FCs. A pesquisa se comprovou de grande valor à área de saúde, podendo ser replicada em demais empresas do ramo médico, de forma a garantir que os devidos recursos estejam disponíveis para que vidas sejam salvas.

PALAVRAS-CHAVE: Ferramentais cirúrgicos ortopédicos. Alocação de recursos. Disponibilidade de ativos. Programação por Metas Ponderada. Arranjo de Taguchi.

ABSTRACT

Resource allocation is an important way to ensure good business productivity. In this context, in the field of healthcare, specifically for orthopedic surgical tools (STs), there is a relatively complex scenario, which causes cancellations and postponements of surgeries due to lack of STs. Due to the aforementioned facts, this thesis was developed in a large multinational company, which operates in the sale of orthopedic prostheses and loans of surgical systems (SSs), which are composed of STs, to perform surgeries. It involves the development of a decision-making aid tool to allocate STs in distribution centers (DCs), in order to optimize the objectives of demand attendance and generating revenue, which are conflicting in some situations. A Mathematical Programming model was developed to determine the monthly demand for surgeries to be attended at each DC, which culminate in the allocation of STs necessary for the attendances. The Weighted Goal Programming (WGP) methodology was applied to model the multi-objective function, in order to work with different combinations of objective weights, the weights being defined through the Taguchi Experiment Design methodology, to evaluate the impacts on the results. The results obtained were in line with the company's reality, culminating in greater efficiency and effectiveness in the STs allocation process. The research proved to be of great value to the health area and can be replicated in other companies in the healthcare field, in order to ensure that the appropriate resources are available so that lives can be saved.

KEYWORDS: Orthopedic surgical tools. Resource allocation. Asset availability. Weighted Goal Programming. Taguchi arrangement.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Bibliometria para “ <i>Multiobjective Optimization</i> ”	18
Figura 2 – Bibliometria para “ <i>Healthcare</i> ”	19
Figura 3 – Mapa de coocorrência de palavras referentes a “ <i>Resource Allocation</i> ” (item 8 da Tabela 1).....	20
Figura 4 – Mapa de coocorrência da Figura 3 centralizado em “ <i>Multiobjective Optimization</i> ”	21
Figura 5 – Mapa de coocorrência da Figura 3 centralizado em “ <i>Healthcare</i> ”	22
Figura 6 – Fluxograma de classificação do trabalho	23
Figura 7 – Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa	25
Figura 8 – Fronteira de Pareto em problema de minimização.....	32
Figura 9 – Etapas do AWSM.....	35
Figura 10 – Dinâmica de experimentos	38
Figura 11 – Ilustração de FCs e próteses, componentes de SCs.....	41
Figura 12 – Ilustração da localização de CDs ao redor no Brasil.....	42
Figura 13 – Fluxo de utilização de SCs	43
Figura 14 – Etapas do processo decisivo guiado pelo modelo.....	50
Figura 15 – Gráfico de efeitos principais para médias	54
Figura 16 – Resultados dos experimentos Taguchi	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados das pesquisas bibliográficas	16
Tabela 2 – Dimensionamento do problema.....	47
Tabela 3 – Demanda mensal de cirurgias SC em cada CD	48
Tabela 4 – Composição de SCs	48
Tabela 5 – Capacidade mensal de atendimento de cirurgias por FC em cada CD	48
Tabela 6 – Coeficientes de segurança de FCs em cada CD	49
Tabela 7 – Ilustração do espaço de busca (demanda de cada SC a ser atendida em cada CD)	50
Tabela 8 – Ilustração de competição entre os objetivos “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada”	51
Tabela 9 – Níveis dos fatores utilizados nos experimentos	51
Tabela 10 – Planejamento de experimentos Taguchi com níveis iniciais.....	52
Tabela 11 – Planejamento de experimentos Taguchi com níveis calculados.....	52
Tabela 12 – Resultados dos experimentos Taguchi.....	53
Tabela 13 – Resultados dos experimentos Taguchi ranqueados	55
Tabela 14 – Comparações de “Demanda a ser Atendida” para diferentes pesos dos objetivos	56
Tabela 15 – Alocação do FC-313 nos CDs 1, 4 e 7.....	57
Tabela 16 – Resultados com e sem otimização	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABM	<i>Agent Based Model</i>
AWSM	<i>Adaptive Weighted Sum Method</i>
CD	Centro de Distribuição
DOE	<i>Design of Experiments</i>
FC	Ferramental Cirúrgico Ortopédico
GP	<i>Goal Programing</i>
MORAP	<i>Multiobjective Resource Allocation Problem</i>
MOPSO	<i>Multiobjective Particle Swarm Optimization</i>
NBI	<i>Normal Boundary Intersection</i>
NC	<i>Normal Constraint</i>
NHS	<i>National Health Service</i>
NP-Difíceis	Polinomiais Não Determinísticos Difíceis
NP-Completo	Polinomiais Não Determinísticos Completos
P	Polinomiais
PL	Programação Linear
PM	Programação Matemática
PO	Pesquisa Operacional
RAP	<i>Resource Allocation Problem</i>
RTN	<i>Regional Trauma Networks</i>
R-RAP	<i>Reliability-Redundancy Allocation Problem</i>
SC	Sistema Cirúrgico
TC	Tempo de Ciclo
TRAP	<i>Testing Resource Allocation Problem</i>
WGP	Programação por Metas Ponderada
WSM	<i>Weighted Sum Method</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA	13
1.2	JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES DA TESE	15
1.3	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	22
1.4	MATERIAIS E MÉTODOS	23
1.5	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	26
1.6	ESTRUTURA DA TESE.....	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
2.1	ALOCAÇÃO DE RECURSOS	28
2.2	OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO E MÉTODOS DE AGLUTINAÇÃO	31
2.2.1	Fronteira de Pareto	32
2.2.2	Programação por metas ponderada (WGP)	35
2.3	DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS E ARRANJO TAGUCHI	37
2.3.1	Arranjo Taguchi	39
3	DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA	41
3.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	41
3.2	MODELAGEM DO PROBLEMA E ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
4	IMPLICAÇÕES GERENCIAIS	59
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	61
5.1	RESPOSTA ÀS QUESTÕES DE PESQUISA E OBJETIVOS	61
5.2	PROPOSTAS PARA FUTURAS PESQUISAS	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados a contextualização da pesquisa e questões da pesquisa, justificativa e contribuições, objetivos, materiais e métodos e, por fim, a estrutura da tese.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

Segundo Hamani (2019), ainda são encontradas poucas aplicações de Pesquisa Operacional (PO), na área de saúde, em países subdesenvolvidos, com citação ao Brasil, pela baixa capacidade de especialização nesta área. O mesmo autor desenvolveu um importante modelo de otimização, para definir a localização de centros médicos com a capacidade de atender o máximo de pacientes, levando-se em consideração a distância e o tempo de deslocamento entre as instalações e as residências dos pacientes (HAMANI, 2019). Priyan (2017) comenta sobre a importância da PO, na área da saúde, em um artigo de revisão sistemática da literatura, citando os seguintes exemplos de aplicações: melhorias de processos na área de saúde, prevenção e tratamento de doenças, gestão da cadeia de suprimentos, alocação de recursos, diagnósticos clínicos e definição de localização de hospitais.

Neste contexto, métodos quantitativos são de suma importância para tornar a área de saúde mais eficiente e garantir atendimentos de qualidade aos pacientes, como pode ser observado na publicação de Lin et al. (2017). Esses autores utilizaram simulação e heurísticas, para resolver um problema multiobjetivo, vinculado a uma combinação de problemas de sequenciamento, visando alocar recursos em uma clínica oftalmológica, com os objetivos de se minimizar: tempo de espera de pacientes, horas extras de recursos e congestionamentos na área de espera. Nesse sentido, Zaerpour et al. (2017) relatam a implementação de um modelo de sequenciamento, para que os pacientes possam fazer os exames clínicos, logo antes das consultas, de forma a maximizar o nível de serviço. O modelo leva em consideração a disponibilidade dos mesmos recursos laboratoriais para atender pacientes de diferentes médicos.

Problema de sequenciamento relacionado à área de saúde também é abordado no artigo de Volland et al. (2017), no qual desenvolveram um modelo, para minimizar a quantidade de enfermeiros necessários ao atendimento em casa. Os autores trabalharam com uma combinação de programação flexível de turnos com problema de programação de tarefas, sem considerar a

restrição de quantidade de profissionais disponíveis. O modelo foi aplicado em 48 instâncias e levou a reduções de 40 a 49% de quantidade de profissionais necessários (VOLLAND et al., 2017). Outra aplicação pode ser encontrada em Cinar et al. (2019), que desenvolveram um modelo de priorização de atendimento de pacientes. O principal objetivo do modelo consiste em priorizar o atendimento a pacientes mais críticos, com o objetivo secundário de minimizar os custos de deslocamento (CINAR et al., 2019). Os autores resolveram o modelo por metaheurísticas, no qual foram observados elevado tempo computacional e boa qualidade de solução e por busca adaptativa em vizinhança de larga escala (ALNS – *Alternative Large Scale Neighborhood Search*), com baixo tempo computacional, porém com qualidade de solução pior em comparação com as metaheurísticas.

Outro problema típico, na área de ativos médicos, é o dimensionamento de equipes para atendimento de saúde domiciliar, como pode ser encontrado em Rodriguez et al. (2015). Neste estudo, foi desenvolvido um modelo de otimização, para se determinar, em horizonte tático, a quantidade ideal de enfermeiras, médicos e especialistas para uma central de atendimento médico domiciliar. Os autores salientam que sistemas de auxílio à tomada de decisão, na área de saúde, são relativamente complexos para se retratar fidedignamente a realidade. Isso acontece em razão da complexidade gerada pela variação de demanda pelos serviços, equipes médicas multidisciplinares, restrições de pacientes terem que ser atendidos pelos mesmos médicos. Hernandez et al. (2020), diferentemente das demais pesquisas citadas, com foco em recursos humanos (enfermeiras, médicos, entre outros), desenvolveram um estudo relacionado ao dimensionamento de recursos físicos e humanos, para o atendimento em saúde domiciliar, levando em consideração as disponibilidades de equipamentos e equipe técnica para o dimensionamento de recursos necessários, além de médicos e enfermeiras.

Com base no que já foi explanado, a importância da medicina ortopédica é salientada no trabalho de Kanakaris e Giannoudis (2011), no qual citam que as mortes por trauma se configuram como a maior causa para todas as cidades na Inglaterra. Os autores exaltam as ações ocorridas, na última década, que levaram à decisão de reestruturação do *National Health Service* (NHS), para o *Regional Trauma Networks* (RTN), que, em conjunto com outras iniciativas, conduzirão o país a melhorias na qualidade do atendimento a pacientes com trauma e, conseqüente, na redução do número de mortes.

Alguns problemas de otimização desenvolvidos, para casos práticos na área de saúde, abrangem objetivos conflitantes. O trabalho de Karsu e Morton (2020), por exemplo, consistiu no desenvolvimento de um modelo de otimização multiobjetivo, para gerar curvas de *tradeoffs*

entre o nível de cobertura por parte da saúde pública e o grau de exposição de pacientes a situações em que doenças podem causar grandes impactos financeiros em suas vidas. Neste sentido, Dias et al. (2018) desenvolveram um modelo de alocação de pacientes eletivos e de emergência em quartos de hospital, com o intuito de minimizar quatro objetivos: tempo médio de espera após admissão, quantidade média de pacientes esperando para serem admitidos, quantidade total de pacientes não admitidos e atrasos ocasionados pelo sistema hospitalar no atendimento de pacientes eletivos. Dentre os métodos de aglutinação de Funções Multiobjetivo, Silva e Marins (2015) realizaram uma revisão literária de Programação por Metas Ponderada (WGP – *Weighted Goal Programming*), que foi aplicada nesta tese.

Aplicação de Delineamento de Experimentos (DOE – *Design of Experiments*) na área de saúde é de suma importância para o direcionamento de decisões importantes, como pode ser observado em Gabriel et al. (2020), aplicaram DOE para se determinar a quantidade de leitos suficientes em um projeto de expansão de um hospital. Nesta tese, será utilizado o método de DOE de Taguchi.

Neste contexto, a presente tese foi norteada pelas seguintes questões de pesquisa:

- Como direcionar a alocação de Ferramentais Cirúrgicos Ortopédicos (FCs) nos Centros de Distribuição (CDs), de forma a maximizar a “Demanda a ser Atendida” e a “Receita a ser Gerada”?
- Os conflitos existentes entre os objetivos “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada” são significativos?
- Quais os impactos esperados em relação ao atendimento de demanda e geração de receita ao se utilizar um modelo de alocação de recursos como auxílio à tomada de decisão em uma empresa de FCs?

1.2 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES DA TESE

O presente estudo foi realizado em uma empresa da área de ortopedia. Juntamente com a venda das próteses ortopédicas, a empresa trabalha com o empréstimo de ferramentais cirúrgicos ortopédicos (FCs) para a realização de cirurgias, visto que, o conjunto de próteses ortopédicas e FCs formam os sistemas cirúrgicos (SCs). A empresa atua, em diferentes regiões do Brasil, atendendo aos hospitais próximos aos seus centros de distribuição (CDs).

O desenvolvimento deste estudo foi motivado pela necessidade de tornar a gestão de FCs mais eficiente. Considerou-se um cenário, no qual a empresa objeto de estudo não possuía

ferramentas de auxílio às tomadas de decisões eficazes, para realizar periodicamente alocações de FCs nos CDs, com o intuito de maximizar atendimento de demanda e receita, sendo constatado que as decisões de transferências de FCs entre CDs eram tomadas de acordo com a experiência de cada planejador. Além disso, por envolver diversas variáveis e objetivos conflitantes, essas atividades demandavam muito esforço dos planejadores os quais nem sempre chegavam a resultados assertivos.

Diante deste cenário, Grida e Zeid (2018) enfatizam a importância de ferramenta de auxílio à tomada de decisão para alocação de recursos hospitalares. Os autores relatam a utilização da teoria das restrições para aumentar em 6% a capacidade de atendimento de um hospital de médio porte. Objetivos e abordagens similares às citadas para este estudo podem ser encontrados no estudo dos autores Vetter et al. (2017), em que exaltam os pontos importantes sobre iniciativas transformacionais, que visam garantir maiores valores a menores custos aos pacientes. Entre os principais tópicos elencados, para se atingir os objetivos esperados em Vetter et al. (2017), destacam-se os seguintes, que podem ser alcançados por meio de modelos de Pesquisa Operacional (PO):

- Definir as equipes, equipamentos necessários, locais e dias certos para se realizar os atendimentos de forma eficiente e eficaz.
- Protocolos e regras para minimizar variação e ineficiências nos atendimentos.
- Tomada de decisão compartilhada entre os pacientes e os médicos, para que o atendimento seja executado de forma colaborativa.

Como forma de se avaliar quantitativamente publicações envolvendo os temas que permeiam o estudo, foram pesquisadas combinações entre as seguintes palavras-chaves, nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus* (bases de dados com maiores representatividades em termos de publicações): “*Linear Programming*”, “*Multiobjective Optimization*”, “*Weighted Goal Programming*”, “*Healthcare*” e “*Resource Allocation*”.

Os resultados da referida pesquisa se encontram na Tabela 1:

Tabela 1 – Resultados das pesquisas bibliográficas

(Continua)

Item	Palavras-chave	Scopus (a)	Web of Science (b)	Desvio $\frac{a}{b} - 1$
1	" <i>Linear Programming</i> "	89.797	55.198	63%
2	" <i>Multiobjective Optimization</i> "	61.847	18.995	226%
3	" <i>Taguchi</i> " and " <i>Design of Experiments</i> "	4.321	1.857	-

Tabela 1 – Resultados das pesquisas bibliográficas

(Conclusão)

Item	Palavras-chave	Scopus (a)	Web of Science (b)	Desvio $\frac{a}{b} - 1$
4	"Weighted Goal Programming"	158	122	30%
5	"Linear Programming" and "Weighted Goal Programming"	86	27	219%
6	"Multiobjective Optimization" and "Linear Programming" and "Weighted Goal Programming" and "Taguchi" and "Design of Experiments"	0	0	-
7	"Healthcare"	508.293	671.708	-24%
8	"Resource Allocation"	136.454	64.118	113%
9	"Healthcare" and "Resource Allocation"	4.013	2.257	78%
10	"Healthcare" and "Multiobjective Optimization"	134	48	179%
11	"Healthcare" and "Resource Allocation" and "Multiobjective Optimization"	10	4	150%
12	"Healthcare" and "Resource Allocation" and "Multiobjective Optimization" and "Linear Programming" and "Weighted Goal Programming"	0	0	-

Fontes: Scopus (2022) e Web of Science (2022).

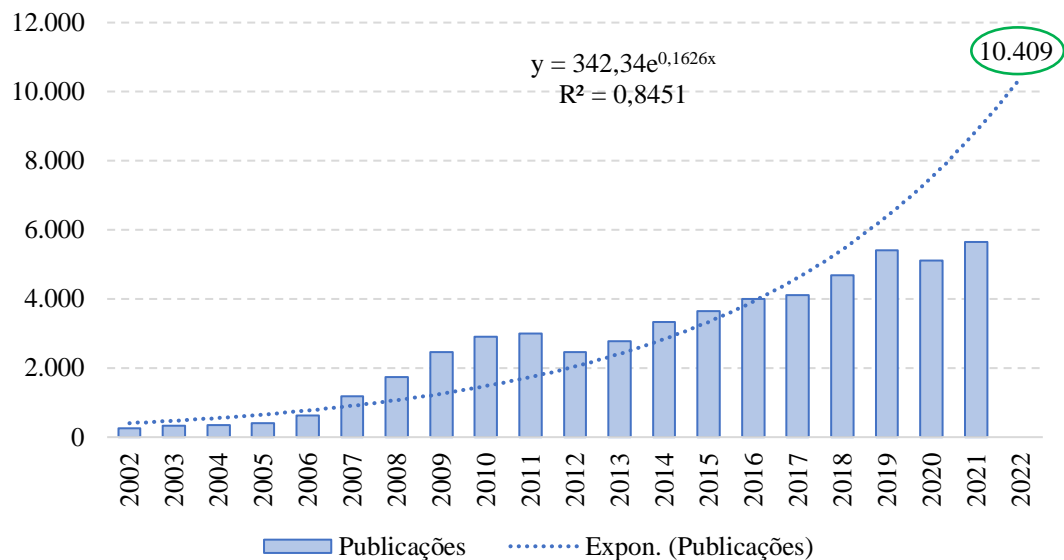
Como pode ser observado na Tabela 1, foi encontrado maior volume de publicações na plataforma *Scopus* (2022), por esse motivo, foram analisados os itens exibidos na Tabela 1 levando-se em consideração os artigos consultados na base de dados da plataforma *Scopus* (2022).

Os itens 1 a 4 da Tabela 1 englobam as palavras-chave que representam os métodos aplicados na modelagem e solução do problema abordado neste trabalho. Como pode ser observado, as palavras-chave isoladas dos itens 1 e 2 representam um número elevado de publicações, sendo 89.797 publicações para o item 1 ("*Linear Programming*") e 61.847 para o item 2 ("*Multiobjective Optimization*"). Também pode ser observado um número expressivo de 4.321 publicações para o item 3 ("*Taguchi*" and "*Design of Experiments*"). Todavia foram encontradas poucas publicações para a palavra-chave "*Weighted Goal Programming*", se mostrando um tema pouco explorado. Adicionalmente, não foram encontradas publicações para as combinações das palavras-chave dos itens 1 a 4, representadas pelo item 6 da Tabela 1.

Casos práticos envolvendo objetivos conflitantes podem ser representados pela palavra-chave "*Multiobjective Optimization*" (item 2 da Tabela 1). É representado na Figura 1 a

evolução das publicações envolvendo a palavra-chave “*Multiobjective Optimization*”, podendo ser observado um crescimento exponencial de publicações, com previsão de 10.409 artigos para 2022:

Figura 1 – Bibliometria para “*Multiobjective Optimization*”



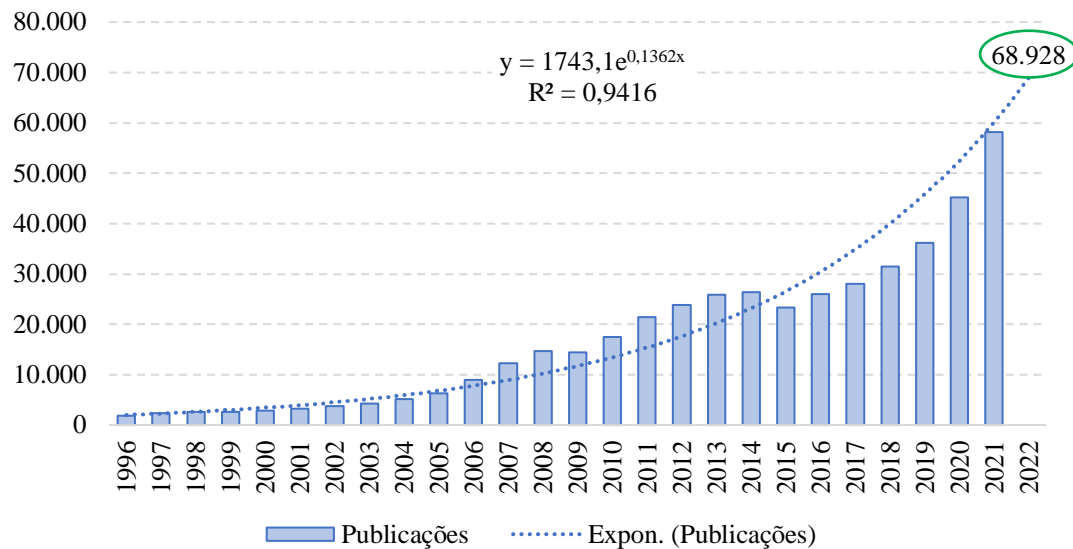
Fonte: *Scopus* (2022).

A otimização multiobjetivo foi de suma importância, para representar fidedignamente as necessidades de negócio da empresa objeto de estudo, por se tratar de um problema multiobjetivo, e um modelo de PL (Programação Linear) foi desenvolvido para prover os resultados necessários como auxílio à tomada de decisão.

A palavra-chave “*Healthcare*” (item 7 da Tabela 1) se refere à parte prática deste estudo, por estar relacionada com a gestão de ativos ortopédicos. Conforme ilustrado na Figura 2, o histórico de publicações relacionado a “*Healthcare*” mostra um crescimento exponencial, com

uma previsão de 68.928 publicações, para o ano de 2022, comprovando assim ser um tema de suma importância na atualidade:

Figura 2 – Bibliometria para “*Healthcare*”

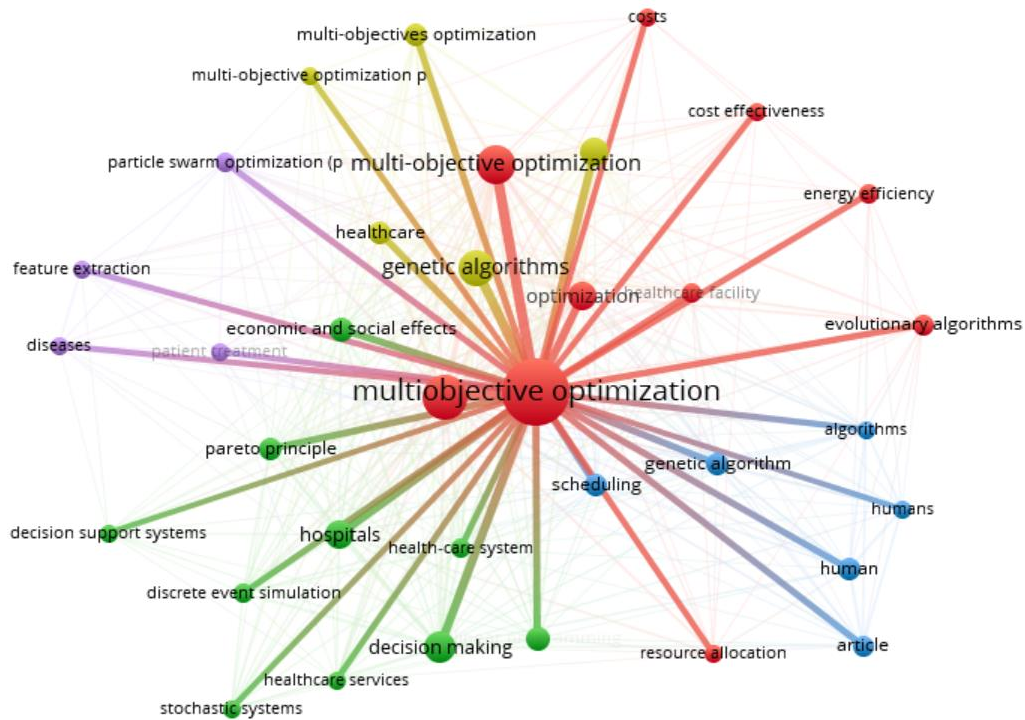


Fonte: *Scopus* (2022).

Para entendimento mais aprofundado das relações entre as palavras-chave “*Healthcare*” e “*Multiobjective Optimization*” (item 10, Tabela 1), as quais fazem parte, respectivamente, da parte prática e teórica deste trabalho, é exibido, na Figura 3, o mapa de coocorrência dessas palavras, em artigos publicados na *Scopus* (2022), utilizado o parâmetro de pelo menos seis como frequência de ocorrência.

Pode ser observado, no mapa da Figura 3, a presença da palavra “*Resource Allocation*” (item 8 da Tabela 1), comprovando que essa importante palavra-chave, que bem descreve o objeto de estudo desta tese, tem relevância entre as demais palavras interligadas aos termos “*Healthcare*” e “*Multiobjective Optimization*”.

Figura 4 – Mapa de coocorrência da Figura 3 centralizado em “*Multiobjective Optimization*”



Fonte: *Scopus* (2022).

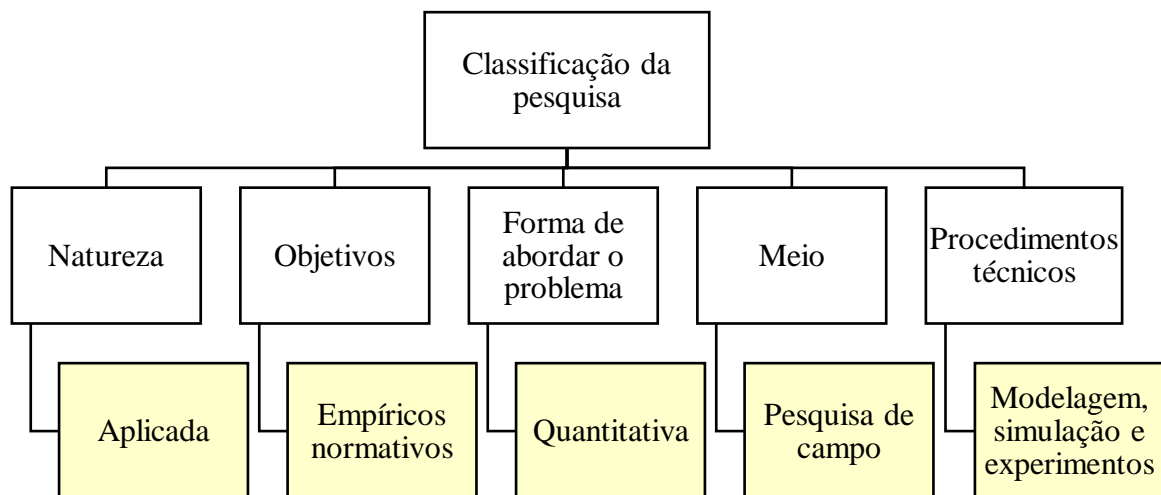
Apesar de “*Healthcare*” fazer parte das palavras-chave do mapa de coocorrência em análise, esse termo aparece com significância relativamente baixa no mapa. Por outro lado, podem ser observadas, na Figura 5 (mapa de coocorrência da Figura 3 centralizado na palavra “*Healthcare*”), relações mais fortes entre “*Healthcare*” e duas palavras diretamente atreladas ao tema desta tese: “*Hospitals*” e “*Multiobjective Optimization*”.

2. Identificar as vantagens dos resultados da otimização do modelo de Programação Matemática (PM), para o problema de alocação de ativos ortopédicos.
3. Realizar análise de sensibilidade dos pesos durante o processo de otimização multiobjetivo por meio do Arranjo de Taguchi.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com Bertrand e Fransoo (2002), Miguel et al. (2010) e Bryman e Bell (2007), este estudo pode ser classificado como uma pesquisa de natureza aplicada, com objetivos empíricos normativos, pois o modelo desenvolvido descreve de forma adequada as relações causais que podem existir na realidade, favorecendo a compreensão de processos reais. A forma de abordar o problema é quantitativa, tendo como meio a pesquisa de campo e, como procedimentos técnicos, a modelagem e simulação. A classificação da pesquisa é exibida em forma de fluxograma na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma de classificação do trabalho



Fonte: Bertrand e Fransoo (2002)

O estudo foi desenvolvido, considerando base de dados que ilustra caso real de uma empresa, composta pelas seguintes informações:

- Inventário de FC disponível, considerando a somatória de todos os CDs: quantas unidades de cada tipo de FC podem ser alocadas nos CDs.
- Composição de SCs por CD: quais FCs fazem parte de cada SC, devendo serem alocados ao CD, para atender à demanda de cirurgias.

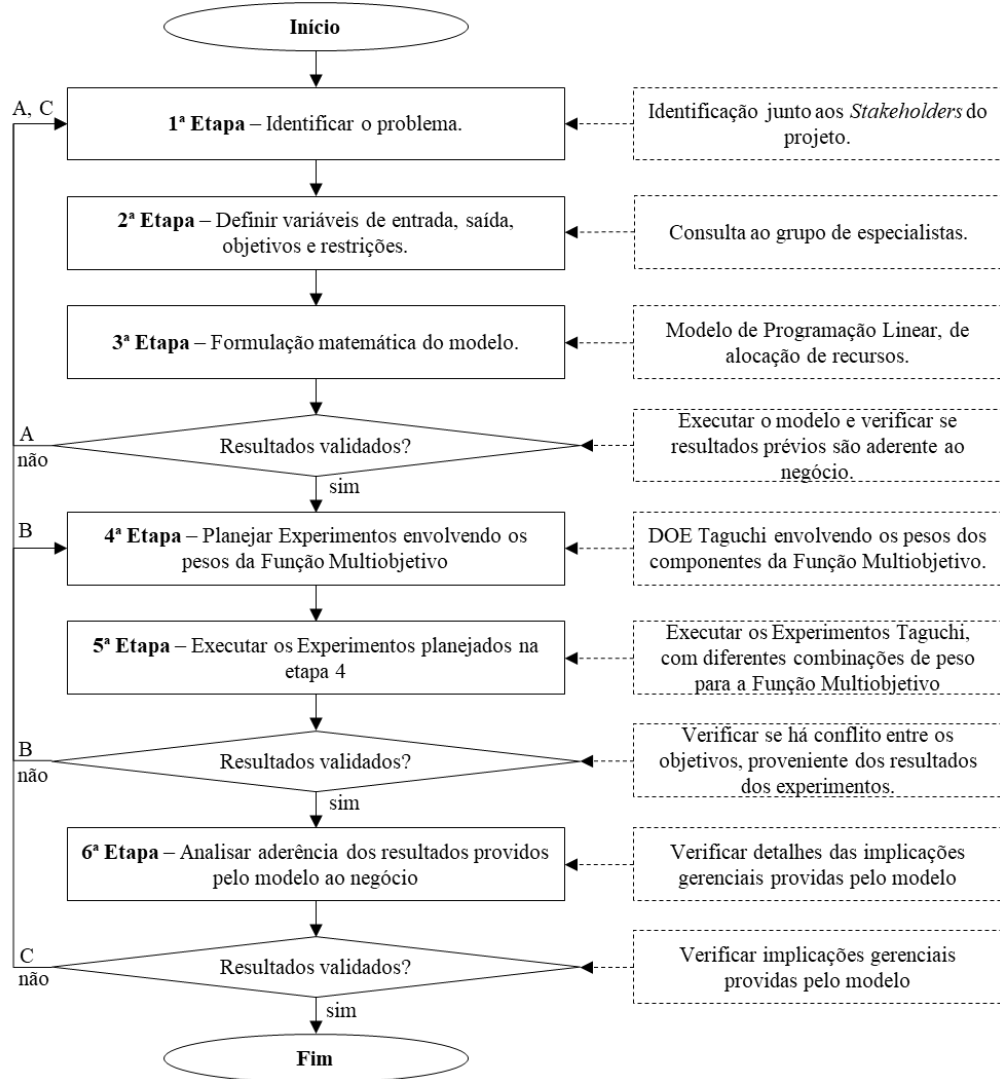
- Tempos de Ciclo Médios de cada FC em cada CD: informação necessária, para se calcular quantos FCs são necessários, para se atender à determinada quantidade de cirurgias por mês.
- Previsão mensal de demanda de cada SC em cada CD: quantas cirurgias podem ser atendidas em cada CD pelo modelo, sendo esse um direcionador do componente da função objetivo “Demanda a ser Atendida”.
- Receita gerada pelo atendimento de demanda em cada CD, para cada SC: utilizado no cálculo do componente “Receita a ser Gerada” da função objetivo.
- Listas de CDs, FCs e SCs.

A seguir encontram-se listados os softwares utilizados, em todas as etapas que fazem parte deste estudo, com suas respectivas aplicações:

- MS Excel - utilizado para a consolidação dos dados de entrada do modelo.
- Python - utilizado para modelagem matemática do problema e resolução por Programação Linear, utilizando a biblioteca Pyomo e o solver GLPK.
- Minitab® - utilizado para planejamento de experimentos Taguchi e análise de resultados.
- As execuções dos modelos foram realizadas em um computador Intel Core i7-1185G7 com 3 GHz e 32GB de RAM, última geração.

O fluxograma de atividades que fizeram parte desta tese está exibido na Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na etapa de identificação do problema (etapa 1), foram realizadas reuniões com gestores e analistas da empresa objeto de estudo, responsáveis pela gestão de ativos ortopédicos. O principal problema exaltado foi a dificuldade em planejar as alocações dos FCs aos CDs, sendo recorrente a situação de deixar de atender pacientes e vender implantes ortopédicos por falta de FCs nos CDs. A referida situação direcionou a necessidade de desenvolvimento de ferramenta de auxílio à tomada de decisão, para direcionar a alocação de FCs em CDs, atividade crítica até então desempenhada pelos colaboradores da empresa sem a devida consideração de todas as variáveis importantes ao negócio de forma conjunta.

Por meio das mesmas reuniões e entendimento do processo, seguiu-se para a segunda etapa do fluxograma de desenvolvimento da pesquisa (“definir variáveis de entrada, saída, objetivos e restrições”), na qual foram definidos como objetivos, a serem atingidos pelo modelo,

a maximização da “Demanda a ser Atendida” e a maximização da “Receita a ser Gerada” pela “Demanda a ser Atendida”, caracterizando o modelo multiobjetivo. Ainda, na segunda etapa, por meio de desenho e análise do fluxo de processos, foram definidas como restrições a demanda de cirurgias e a disponibilidade de FCs. Todavia, além dos dados de entrada mapeados, para fazer parte do modelo, foram utilizadas também informações provenientes de modelo de previsão de demanda, modelo preditivo de composição de SCs, modelo preditivo de tempo de ciclo de FCs, entre outras informações importantes para o negócio.

Após a execução das etapas 1 e 2, foi realizada, na etapa 3, a formulação matemática do problema, sendo detalhada no Capítulo 3. Na etapa 4, foram planejados os experimentos, seguindo o Arranjo Taguchi, para se trabalhar com diferentes combinações de pesos para a Função Multiobjetivo. A etapa 5 é uma continuação da etapa 4, e consiste em se executar os experimentos planejados, bem como avaliar os resultados, de forma a verificar se os níveis dos fatores foram bem planejados e se há conflito entre os objetivos “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada”.

Por fim, a 6ª e última etapa consiste em avaliar os resultados providos pelo modelo ao negócio, de forma a verificar se proverá sugestões de decisões importantes e aderentes ao negócio.

1.5 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O objeto de estudo desta tese é um problema real de uma empresa multinacional de grande porte, do ramo de saúde. A empresa atua com a venda de próteses ortopédicas e empréstimo de FCs (Ferramentais Cirúrgicos Ortopédicos), para que os médicos realizem as cirurgias. A empresa possui diferentes CDs (Centros de Distribuição) espalhados ao redor do Brasil, que atendem aos hospitais locais. Para maximizar a “Demanda a ser Atendida” e a “Receita a ser Gerada”, foi desenvolvido nesta tese um modelo de alocação de FCs nos CDs, como auxílio à tomada de decisão.

Como delimitação desta tese no contexto dos métodos de aglutinação, será utilizada a WGP. Assim, os estudos de outros métodos de aglutinação não serão tratados nesta tese. Foi aplicado delineamento de experimentos para se trabalhar com diferentes combinações de pesos dos objetivos “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada”. Por fim, como última etapa da delimitação teórica desta tese, o modelo será resolvido por meio de Programação Linear.

1.6 ESTRUTURA DA TESE

Além deste capítulo de introdução, a estrutura deste estudo contempla mais 4 capítulos. O Capítulo 2 trata da fundamentação teórica, passando pelos seguintes temas: alocação de recursos, otimização multiobjetivo, métodos de aglutinação e técnicas de delineamento de experimentos. O Capítulo 3 aborda a descrição e modelagem do problema, com enfoque em sua estrutura, objetivos e restrições. No Capítulo 4 encontram-se as análises de resultados e implicações gerenciais. Por fim, no Capítulo 5 são abordadas as conclusões, verificações dos objetivos e sugestões para estudos futuros. Finalmente apresenta-se as referências bibliográficas que foram utilizadas para a elaboração dessa tese.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os conceitos teóricos que permeiam este estudo, abrangendo alocação de recursos, otimização multiobjetivo, métodos de aglutinação e técnicas de delineamento de experimentos.

2.1 ALOCAÇÃO DE RECURSOS

Problema de Alocação de Recursos (RAP – *Resource Allocation Problem*) é definido por Bovin e Naess (2018) como problema de distribuição de recursos escassos, em cenários competitivos, normalmente, para maximizar lucro ou minimizar custos. Acar e Basciftci (2021) complementam a definição de alocação de recursos como função gerencial, cujo objetivo é tornar disponível a capacidade necessária de recursos, para se realizar as atividades planejadas, de forma a garantir nível de serviço desejado aos clientes, ou aumentar a competitividade e produtividade.

De acordo com Kurth et al. (2017), o desafio de alocar recursos finitos é comum aos ambientes de negócios e com ampla dedicação da PO para o desenvolvimento de abordagens baseadas em otimização discreta e simulação. Jiang et al. (2018) afirmam que o fato de recursos serem caros e escassos torna importante a aplicação de modelos de alocação de recursos em problemas práticos. Essas aplicações são muito abrangentes, variando desde modelos de planejamento urbano, encontrado em Wei et al. (2020), até modelos de planejamento de manutenção em usinas eólicas, em Zhang e Yang (2021).

A formulação genérica do RAP pode ser encontrada em Shi et al. (2020), conforme exposto a seguir:

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^n f_i(x_i) \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{i=1}^n g_i(x_i) \leq b \quad (2)$$

$$l_i \leq x_i \leq u_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$x_i \in Z^+ \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

sendo x_i os recursos a serem alocados, f_i o valor agregado pelo recurso x_i à função objetivo a ser minimizada, g_i a função que representa o consumo do recurso x_i , b a quantidade de recursos disponíveis e, por fim, l_i e u_i representam os limites inferiores e superiores das variáveis de decisão x_i , dado que o domínio da variável x_i deve pertencer ao conjunto dos números inteiros e positivos Z^+ .

Para a área de saúde, existem várias aplicações práticas importantes, como a abordada no artigo de Yousefi e Yousefi (2019), que foca na alocação de recursos humanos, no departamento de emergência de hospitais, com o principal objetivo de garantir médicos disponíveis para atendimento da demanda e com recursos financeiros como principal limitação. Assim, como recursos humanos, recursos físicos também são de fundamental importância na área de saúde, sendo esse o tema abordado no trabalho de Wu et al. (2020), no qual desenvolveram um modelo, baseado na teoria das filas, para sequenciamento de ocupação de leitos de um hospital.

Mao et al. (2020) abordaram a alocação de recursos para manutenção de pontes, considerando também impactos no tráfego, durante as manutenções, como integrante da função multiobjetivo. Considerando a natureza dos recursos a serem alocados, RAPs são divididos em dois grupos principais: RAPs discretos, quando os recursos a serem alocados são discretos e RAPs contínuos são aplicados em situações nas quais os recursos são contínuos, sendo a maioria das aplicações práticas representadas pelos RAPs discretos (GONG et al., 2012). Outros RAPs com importantes aplicações práticas são os modelos baseados em agentes (ABM – *Agent Based Model*), que são compostos por entidades, com diferentes características e que interagem entre si, conforme definido por Yousefi e Ferreira (2017), sendo essa uma das características do modelo abordado nesta tese, em que diferentes FCs formam SCs necessários para a realização de cirurgias.

Yousefi e Yousefi (2020) citam registros de aplicações de ABM, nos mais diversos campos, desde planejamento de manufatura a aplicações em ciências sociais. São encontradas na literatura publicações com outras importantes derivações do RAP para solucionar problemas com características distintas, tais como:

- Problema de alocação de recursos para testes (TRAP – *Testing Resource Allocation Problem*), é abordado em Pietrantuono (2020) e consiste em alocar recursos para realizar testes, considerando custos de testes, benefícios e disponibilidade de recursos. Pietrantuono (2020) apresentam uma revisão sistemática da literatura, envolvendo aplicações de TRAP, em testes de softwares,

durante as etapas de desenvolvimentos e validações, sendo esse um grande desafio enfrentado pelas empresas (PIETRANTUONO, 2020).

- Problema de alocação de recursos com redundância e confiabilidade (R-RAP – *Reliability-Redundancy Allocation Problem*), encontrado no trabalho de Huang et al. (2021), tem o objetivo de maximizar a confiabilidade de sistemas, por meio de redundâncias geradas por sistemas que operam para um mesmo fim. Huang et al. (2021) combinaram algoritmos metaheurísticos de Otimização por Nuvem de partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*) e Otimização por Nuvem Simplificada (SSO – *Simplified Swarm Optimization*) para a resolução de R-RAP.
- Problema multiobjetivo de alocação de recursos (MORAP – *Multiobjective Resource Allocation Problem*), explorado por Acar e Basciftci (2021), é formada por problemas RAP compostos por dois ou mais objetivos. O tema principal de Acar e Basciftci (2021) foi o desenvolvimento de algoritmo metaheurístico de colônia de abelhas para solucionar problemas MORAP disponíveis na literatura.

Cabe ressaltar que a derivação de problemas RAP que melhor caracteriza o problema abordado nesta tese é a MORAP, por se tratar de resolução de um problema composto por dois objetivos (maximização de “Demanda a ser Atendida” e de “Receita a ser Gerada”) que se comportam de maneira conflitante em determinadas situações. Em relação à complexidade, RAP e problemas de PO, em geral, podem ser classificados em Polinomiais (P), Polinomiais Não Determinísticos Difíceis (NP-Difíceis) e Polinomiais Não Determinísticos Completos (NP-Completos) (DAGUM e LUBY, 1992).

De acordo com Dagum e Luby (1992), problemas são classificados como P, quando a complexidade de tempo de resolução pode ser expressa em equações polinomiais, conforme representado em (5), enquanto problemas NP-Completos e NP-Difíceis têm a complexidade de tempo de resolução representadas por funções exponenciais, conforme Equação 6:

$$T(n) = O(C \times n^k) \quad (5)$$

$$T(n) = O(C_1 \times k^{C_2 \times n}) \quad (6)$$

sendo C_1 , C_2 e k constantes, devendo respeitar as condições de $C_1 > 0$ e $C_2 > 0$, e n representa a quantidade de dados de entrada.

Segundo Acar e Basciftci (2021) os MORAP são classificados como NP-Difíceis. Dagum e Luby (1992) explicam que problemas NP-Completos apresentam características de problemas

NP e NP-Difícil, enquanto problemas NP-Difíceis apresentam tempo exponencial de resolução e a verificação dos resultados é complexa. No entanto problemas NP-Completos também apresentam tempo exponencial de resolução, porém o tempo de verificação da solução é polinomial (DAGUM e LUBY, 1992).

2.2 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO E MÉTODOS DE AGLUTINAÇÃO

Acar e Basciftci (2021) definem problemas multiobjetivos como problemas compostos por dois ou mais objetivos conflitantes, que consistem em encontrar um grupo de soluções com relações *trade-off* entre objetivos conflitantes. De acordo com Emmerich e Deutz (2018), otimização multiobjetivo é muito importante, para retratar fidedignamente casos reais, sendo tal fato comprovado por inúmeras publicações de otimização multiobjetivo, abrangendo as mais diversas áreas, inclusive, a de saúde. Audet et al. (2021) abordam a representação geral de funções multiobjetivos conforme em (7):

$$\text{Min } F(x) = [f_1(x) \ f_2(x) \ \dots \ f_m(x)] \quad (7)$$

sendo x as variáveis do problema, f_i as m funções objetivo para $i = 1, 2, \dots, m$, com $m \geq 2$.

De acordo com Romão (2020), métodos de otimização multiobjetivo são divididos em dois grupos: métodos de priorização e de aglutinação. No grupo de priorização, uma das tratativas clássicas é considerar a resposta principal como objetivo e as demais respostas viram restrições. Já os métodos de aglutinação consistem em aglutinar diferentes objetivos em uma única função (ROMÃO, 2020). O método abordado nesta tese é o Programação por Metas Ponderada (WGP – *Weighted Goal Programming*) e foi escolhido pela aderência à situação do problema a modelado. A WGP pertence ao grupo de aglutinação que, segundo Emmerich e Deutz (2018), é dividido nos seguintes subgrupos:

- Métodos a priori - o tomador de decisões deve pré-definir parâmetros, como priorização de objetivos, que influenciarão diretamente nos resultados dos modelos. Marler e Aurora (2004) citam os seguintes exemplos de métodos a priori: método *desirability*, método das somas ponderadas (WSM – *Weighted Sum Method*), Programação por Metas (GP – *Goal Programming*) e Método Lexicográfico.

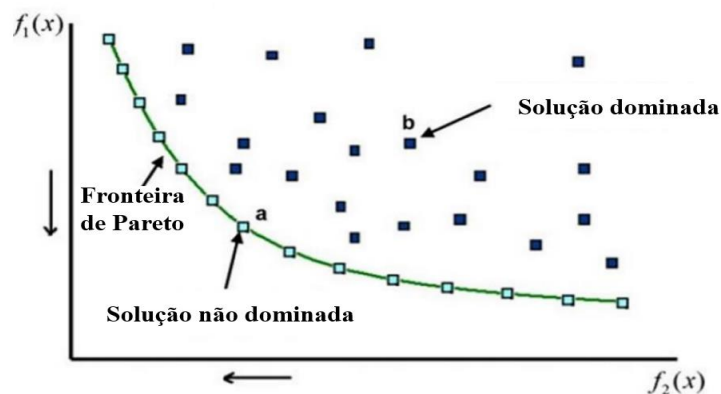
- Métodos a posteriori - esses métodos são aplicados, após a execução do modelo de otimização multiobjetivo e consistem em selecionar soluções do conjunto Pareto de Soluções que se adequem às priorizações estipuladas pelo tomador de decisões. Marler e Aurora (2004) citam os seguintes exemplos de métodos a posteriori: Método da Programação Física, Método da Interseção Normal à Fronteira (NBI – *Normal Boundary Intersection*) e Método da Restrição Normal (NC – *Normal Constraint*).
- Métodos iterativos - as priorizações e demais parâmetros do modelo são redefinidos pelo usuário múltiplas vezes, em tempo de execução, após analisar resultados obtidos em diferentes momentos. Meignan et al. (2015) citam os seguintes exemplos de métodos Iterativos: Algoritmos Evolucionários Iterativos, Busca Guiada por Humano e Otimização Multiobjetivo Interativa.

Cabe ressaltar que WGP pertence ao grupo de métodos a priori, conforme Silva et al. (2021), e será detalhado, em capítulo posterior a este. Nas próximas seções, serão apresentados os seguintes conceitos importantes de otimização multiobjetivo: fronteira de Pareto e WGP.

2.2.1 Fronteira de Pareto

Somma (2016) define fronteira de Pareto como o conjunto de soluções não dominadas, em um problema multiobjetivo e ilustra fronteira de Pareto, para um problema de minimização genérico, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Fronteira de Pareto em problema de minimização



Fonte: Somma (2016).

Na Figura 8, $f_1(x)$ e $f_2(x)$ são os objetivos de um problema multiobjetivo, b um exemplo de uma solução dominada e a um exemplo de uma solução não dominada. Audet et al. (2021) definem matematicamente que um vetor de decisão z^1 domina um vetor z^2 , em um problema de minimização, se e somente se $z_i^1 \leq z_i^2$ e $z^1 \neq z^2 \quad \forall i$.

De acordo com Audet et al. (2021), um vetor z^1 é considerado componente do conjunto Pareto ótimo de soluções, caso não for dominado por nenhum outro vetor de soluções pertencente ao espaço de soluções factíveis (soluções que respeitam todo o conjunto de restrições). Ainda, segundo os autores, aproximação de fronteira de Pareto são os resultados obtidos, em resolução de problemas multiobjetivos, com crescimento recente de desenvolvimento de algoritmos, para a solução de modelos multiobjetivos, que culminou na introdução de vários indicadores de desempenho para aproximações da fronteira Pareto.

De acordo com Zitzler et al. (2008), uma aproximação da fronteira Pareto deve satisfazer as seguintes situações, que são consideradas nas medidas de qualidade dos resultados:

- A distância entre a fronteira de Pareto e os resultados obtidos deve ser minimizada.
- A aproximação da fronteira Pareto deve apresentar uma boa distribuição de pontos no espaço de objetivos.
- A aproximação da fronteira de Pareto deve ser maximizada (para cada objetivo deve haver uma quantidade significativa de pontos não dominados).

Zitzler et al. (2008) classificam os indicadores de desempenho de aproximações de fronteiras Pareto, em quatro grupos, listados e explicados a seguir:

- Indicadores de Cardinalidade - quantificam a quantidade de pontos não dominados gerados pelo algoritmo.
- Indicadores de Convergência - quantificam quão próximo o conjunto de pontos não dominados está da fronteira Pareto.
- Indicadores de distribuição e cobertura - quantificam a distribuição da aproximação da fronteira Pareto gerada pelo algoritmo, de forma a verificar quão bem representada é cada região do espaço de objetivos. Cobertura e uniformidade das soluções são fatores que contribuem para a diversidade da aproximação da fronteira Pareto.
- Indicadores de convergência e distribuição - abrangem simultaneamente as propriedades de convergência e distribuição.

Para a obtenção de resultados de aproximações de fronteira de Pareto, são utilizados métodos de aglutinação em modelagem de problemas multiobjetivos (KIM e WECK, 2005). Um dos métodos clássicos de aglutinação é o método das Somas Ponderadas (WSM – *Weighted Sum Method*), que, conforme Kim e Weck (2005), é um método tradicional de modelagem de funções multiobjetivo, que consiste em permitir a busca por Soluções Pareto Ótimas, uma a uma, sistematicamente, alterando os pesos dos diferentes objetivos que compõem a função multiobjetivo. Marler e Arora (2004) afirmam que aplicações práticas do WSM são extensas, porém, em sua maioria, abrangendo problemas compostos por somente dois objetivos.

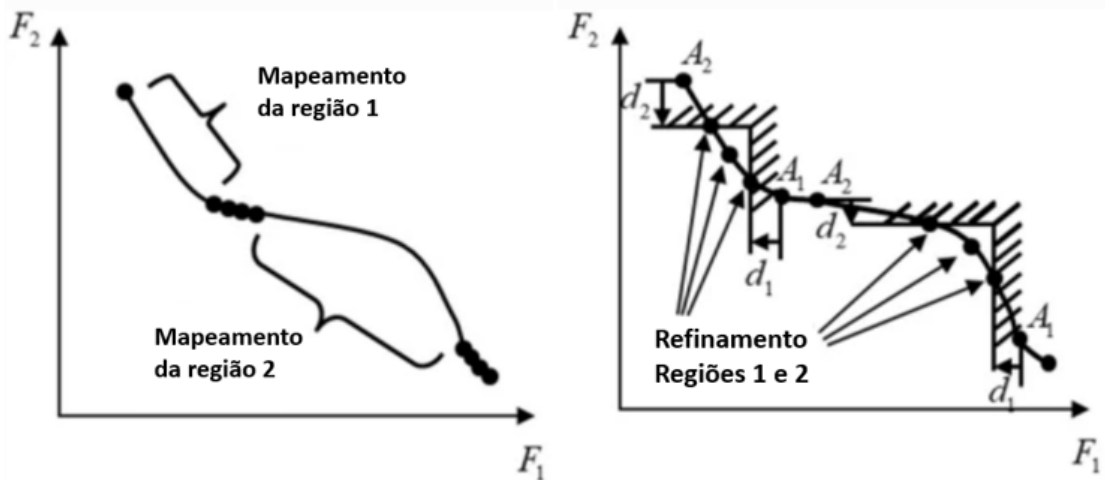
De acordo com Marler e Arora (2004), o método das somas ponderadas pode ser representado, de acordo com a Equação 8:

$$U = \sum_{i=1}^k w_i F_i(x) \quad (8)$$

sendo U a função multiobjetivo, w_i o peso da função objetivo F_i e k o número de objetivos que compõem o modelo.

O método das somas ponderadas adaptativo (AWSM – *Adaptive Weighted Sum Method*), derivado do WSM, é mais indicado para situações nas quais se deseja obter o conjunto de soluções Pareto Ótimas, por garantir maior quantidade de soluções alterando os pesos dos objetivos de forma adaptativa (DEEPIKA e ONKAR, 2021). De acordo com Deepika e Onkar (2021), o AWSM consiste em encontrar e refinar regiões da fronteira de Pareto com poucas soluções (situações em que a distância euclidiana entre duas soluções subsequentes é relativamente grande), gerando mais soluções para essas regiões, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Etapas do AWSM



Fonte: Deepika e Onkar (2021).

Na Figura 9, a imagem da esquerda representa a ilustração de regiões mapeadas com poucas soluções e a imagem da direita, a ilustração do refinamento das soluções nessas regiões.

Wang et al. (2018) afirmam que, para os métodos WSM e AWSM, é indicada a normalização das funções objetivo que compõem o modelo multiobjetivo, pois podem ser objetivos com diferentes ordens de grandeza e unidade de medida. É exibido, na Equação 9, extraída de Wang et al. (2018), o processo de normalização das funções objetivo:

$$\bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{z_i^{nad} - z_i^*} \quad (9)$$

sendo \bar{f}_i a função objetivo normalizada, z_i^* o valor mínimo da função objetivo i e z_i^{nad} o valor máximo da função objetivo i e f_i é a função objetivo i . Wang et al. (2018) ressaltam que, caso z_i^* e z_i^{nad} não sejam conhecidos, devem ser estimados dentro do espaço de soluções viáveis.

2.2.2 Programação por metas ponderada (WGP)

Conforme salientado em capítulo anterior, a WGP aplicada nesta tese pertence ao grupo de otimização por aglutinação a priori. Na seção anterior, foram explicados os métodos de otimização multiobjetivo WSM e AWSM. Nesta seção, serão apresentadas explicações sobre o método de otimização multiobjetivo a priori WGP.

Silva e Marins (2015) destacam que a Programação por Metas (GP – *Goal Programming*), da qual a WGP é derivada, foi desenvolvida para se flexibilizar restrições em problemas de otimização determinística, procurando um melhor resultado para a função multiobjetivo, considerando as metas estabelecidas para cada objetivo.

Sendo assim, o método escolhido para a aglutinação da função multiobjetivo é bem aderente ao estudo abordado nesta tese, uma vez que permite estabelecer uma meta de “Receita a ser Gerada” permitindo que o objetivo principal “Demanda a ser Atendida” seja maximizado. Ou seja, permite que o tomador de decisões avalie cenários que garantam o atendimento de pacientes e a saúde financeira da empresa. Outro ponto positivo é o fato de se poder trabalhar com restrições flexíveis, permitindo assim tomar melhores decisões, considerando a compra de novos Ferramentais Cirúrgicos Ortopédicos (FCs), quando se flexibiliza a restrição de FCs disponíveis.

Conforme publicações de Tamiz et al., (1995, 1998), Yaghoobi e Tamiz (2007), Chang (2007, 2008), Liao (2009), Caballero et al. (2009), e Jamalnia e Soukhakian (2009), existem diversos enfoques de GP, dentre os quais se destacam:

- Programação por Metas Ponderada (WGP – *Weighted Goal Programming*) - nesta abordagem, são atribuídos pesos para às variáveis de desvios, que compõem a função objetivo, sendo esses desvios referentes às metas estabelecidas para os objetivos.
- Programação por Metas com Priorização (LGP – *Lexicographic Goal Programming*) - em LGP, se trabalha com hierarquização dos objetivos, de acordo com sua importância.
- Programação por Metas Minmax (Minmax GP – *Minmax Goal Programming*) - em Minmax GP, se trabalha com as funções de realização que consideram a soma das variáveis desvio.
- Programação por Metas Estendida (EGP – *Extended Goal Programming*) - é uma combinação convexa de LGP, Minmax GP e WGP.
- Programação por Metas Inteira (IGP – *Integer Goal Programming*) - neste enfoque, trabalha-se com funções de penalidade à flexibilização das restrições.
- Programação por Metas Binária (BGP – *Binary Goal Programming*) - quando se permite ao modelo a decisão sobre o atendimento ou não das metas estabelecidas aos objetivos, por meio da inclusão de variáveis binárias.
- Programação por Metas e Análise por Envoltória de dados (GPDEA – *Goal Programming and Data Envelopment Analysis*) - desenvolvida para permitir trabalhar

com DEA em situações em que o número de DMUs é inferior à quantidade de variáveis de entrada e saída do modelo.

De acordo com Martel e Aouni (1998) o modelo WGP, utilizado nesta tese, é formulado conforme (10) – (12):

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n (w_i^+ d_i^+ + w_i^- d_i^-) \quad (10)$$

sujeito a:

$$x \in F, x_i, d_i^+, d_i^- \geq 0, d_i^+ \times d_i^- = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$Ax \leq c \text{ e } f_i(x) - d_i^+ + d_i^- c = g_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

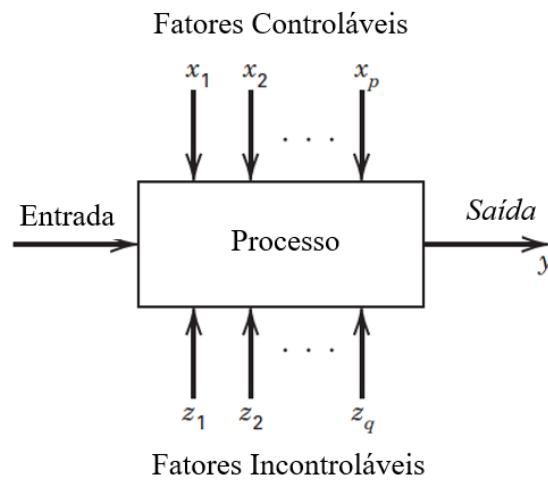
sendo $f_i(x)$ as múltiplas funções objetivo, x o vetor das variáveis de decisão do modelo, d_i^+ e d_i^- as variáveis auxiliares de desvio para mais e para menos, vinculadas a cada meta g_i estabelecida para cada objetivo i , w_i^+ e w_i^- os pesos atribuídos, respectivamente, às variáveis de desvio d_i^+ e d_i^- e, por fim, A e c , respectivamente, a matriz dos coeficientes do lado esquerdo das variáveis (LHR) e o vetor de constantes do lado direito (RHS), nas restrições rígidas do modelo original.

2.3 DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS E ARRANJO TAGUCHI

Durakovic (2017) destaca que Delineamento de Experimentos (DOE – *Design of Experiments*) é uma técnica de planejamento e condução de experimentos, cujo objetivo é avaliar estatisticamente os efeitos das variáveis explicativas, manipuladas nos experimentos, na variável resposta y .

Para Franceschini e Macchietto (2008), DOE é uma importante ligação entre os mundos de experimentos e de modelagem, direcionando conclusões estatísticas que agregam alto valor aos negócios. Montgomery (2013) define experimento como sequência de testes com mudanças propositais, em variáveis de entrada, com o intuito de se observar os impactos na variável resposta. Os fatores envolvidos em um experimento são ilustrados por Montgomery (2013) na Figura 10.

Figura 10 – Dinâmica de experimentos



Fonte: Montgomery (2013).

Na Figura 10, “Processos” podem ser combinações de processos, máquinas, pessoas e outros recursos que transformam a “Entrada” (normalmente materiais) em uma “Saída”, que pode ser representada por mais de uma variável resposta. Algumas variáveis de processos e propriedades de materiais são controláveis, representando “Fatores Controláveis”, e outros não são controláveis, representando “Fatores Incontroláveis” (MONTGOMERY, 2013).

Silva (2019) explica que a variável de interesse y está relacionada aos fatores x_i , sendo formulada conforme Equação 13:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \epsilon \quad (13)$$

sendo ϵ o erro aleatório, composto por variações da variável resposta y , as quais não são explicadas pelas variáveis explicativas x_i .

Os principais objetivos de experimentos comentados por Montgomery (2013) são listados a seguir:

- Determinar quais variáveis mais influenciam na resposta y .
- Determinar valores das variáveis de entrada influentes x 's para que o valor de y fique quase sempre próximo ao desejável.
- Determinar valores das variáveis influentes x 's que culminem em baixa variabilidade em y .
- Determinar valores das variáveis influentes x 's que minimizem as influências das variáveis incontroláveis z_1, z_2, \dots, z_n .

Arectout et al. (2021) resumem DOE como uma metodologia que consiste em definir diferentes níveis para cada fator e organizar experimentos, variando simultaneamente diferentes fatores, para então identificar os impactos das variáveis explicativas na variável resposta. Nesse contexto, Silva (2019) complementa que DOE é utilizado, para identificar os fatores x_i importantes em um processo e, posteriormente, aplicar um algoritmo, visando otimizar o experimento do processo estudado.

Existem na literatura diferentes metodologias de DOE, sendo listadas, a seguir, algumas metodologias encontradas em Montgomery (2019):

- Experimentos fatoriais completos.
- Experimentos fatoriais fracionados.
- Experimentos fatoriais de dois e três níveis.
- Arranjo de Taguchi.
- Metodologia da Superfície de Resposta.
- Delineamento de Mistura.

Nesta tese foi utilizado o Arranjo Taguchi para a resolução de um problema real. A próxima seção consiste no detalhamento deste procedimento.

2.3.1 Arranjo Taguchi

O Arranjo de Taguchi foi introduzido por Genichi Taguchi, inicialmente no campo da estatística, passando posteriormente a ser aplicado em diversas áreas de atuação, tais como: engenharia, marketing, biotecnologia e propagandas (NAGARAJ et al., 2021)

A quantidade mínima de experimentos a serem executados pelo Arranjo de Taguchi é calculado conforme Equação 16 (DEEPANRAJ et al., 2017):

$$(L - 1) \times P \tag{14}$$

sendo L os níveis a serem planejados para cada parâmetro e P a quantidade de parâmetros.

Sendo assim, no Arranjo de Taguchi tem essa importante flexibilidade de definição da quantidade de níveis a serem considerados no planejamento de experimentos. Em Deepanraj et al. (2017), por exemplo, foram planejados experimentos envolvendo 4 níveis, para 5 fatores, no processo abordado na publicação.

De acordo com Mandal et al. (2011), Arranjo de Taguchi pode ser categorizado em menor melhor, maior melhor e nominal melhor, de acordo com as necessidades em relação às variáveis respostas, com suas respectivas fórmulas para cálculo de S/N (sinal-ruído), utilizada para a determinação da condição ótima para as variáveis respostas, devendo este valor ser maximizado para as três categorias:

(a) Cálculo de S/N para a condição Menor, Melhor, dado por (15),

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (15)$$

(b) Cálculo de S/N para a condição Maior, Melhor (situação do problema abordado nesta tese), dado por (16),

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (16)$$

(c) Cálculo de S/N para a condição Nominal, Melhor, dado por (17),

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{y}}{S_y^2} \right) \quad (17)$$

sendo y o valor da variável resposta obtido em cada experimento, \bar{y} a média dos valores das variáveis respostas, n a quantidade total de experimentos realizados e S o desvio padrão de y , considerando todos os resultados de todos os experimentos realizados.

3 DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA

Neste capítulo serão abordados a descrição do problema, com o detalhamento do problema enfrentado pela empresa objeto de estudo, decisões a serem direcionadas pelo modelo, objetivos e restrições do problema. A descrição e modelagem do problema seguirão o fluxograma de desenvolvimento da pesquisa, detalhado na Figura 6 e presente no Capítulo 1, Seção 1.4.

É importante salientar que informações quantitativas contidas nesta tese, tais como previsão de demanda, receitas geradas por sistemas cirúrgicos (SCs), quantidade de centros de distribuição (CDs), inventário de ferramentais cirúrgicos (FCs), entre outras, foram descaracterizadas, de forma a não expor informações confidenciais da empresa.

3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O presente estudo foi realizado em uma empresa da área de ortopedia. A empresa objeto de estudo trabalha com o empréstimo de FCs, para a realização de cirurgias, já que o conjunto de próteses ortopédicas e FCs formam os SCs, exemplificados na Figura 11.

Figura 11 – Ilustração de FCs e próteses, componentes de SCs



Fonte: Leonardi (2021), Mackenzie (2021) e SPCPL (2021).

A empresa atua em diferentes regiões do Brasil, atendendo aos hospitais próximos aos seus CDs. Na Figura 12, são ilustradas localizações fictícias dos CDs, ao redor do Brasil, de forma a preservar informações da empresa.

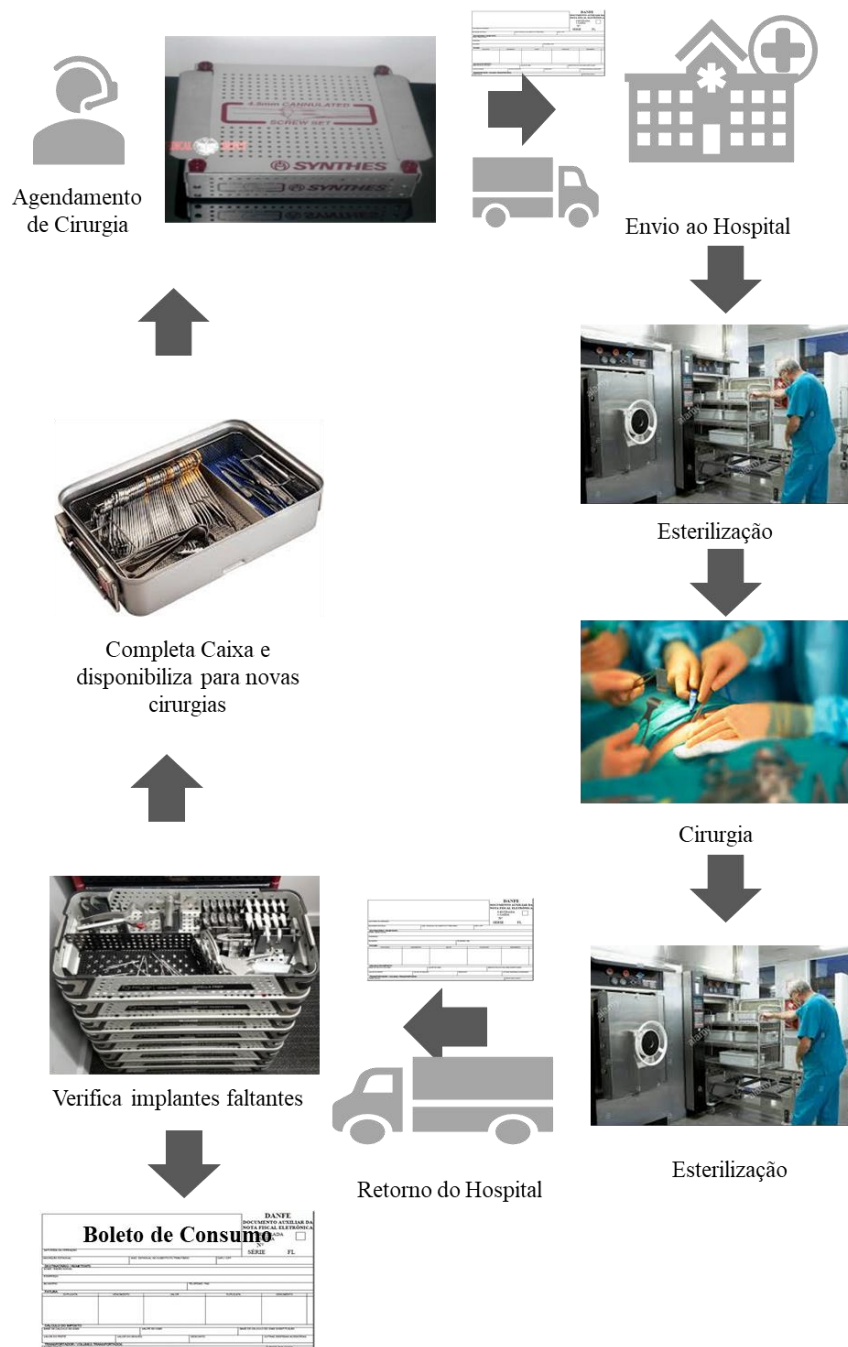
Figura 12 – Ilustração da localização de CDs ao redor no Brasil



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Um dos pontos importantes na modelagem é a consideração do tempo de ciclo (TC) dos FCs, que são medidos, considerando o tempo médio entre a saída do FC do CD e o seu retorno, após a realização da cirurgia. O fluxo de solicitação, utilização e retorno do SC ao CD é ilustrado na Figura 13, abrangendo as etapas de requisição do SC pelo hospital, trâmites fiscais e financeiros, utilização do SC, esterilizações do SC e logísticas de envio e recebimento entre o CD e o hospital.

Figura 13 – Fluxo de utilização de SCs



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

A seguir, são retomadas e detalhadas as etapas do fluxograma de desenvolvimento da pesquisa, bem como exibidos os respectivos resultados.

3.2 MODELAGEM DO PROBLEMA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

1ª Etapa – Identificar o problema

O desenvolvimento deste estudo foi motivado pela necessidade de tornar a gestão de FCs mais eficiente. Considerou-se um cenário, no qual a empresa objeto de estudo não tinha ferramentas de auxílio à tomada de decisão eficazes, para realizar, periodicamente, alocações de FCs nos CDs, com o intuito de maximizar atendimento de demanda e receita. Desta maneira, foi constatado que as decisões de transferências de FCs entre CDs eram tomadas, de acordo com a experiência de cada planejador. Além disso, por envolver diversas variáveis e objetivos conflitantes, essas atividades demandavam muito esforço por parte dos planejadores, que nem sempre chegavam a resultados assertivos.

Seguindo as etapas do fluxograma de desenvolvimento da pesquisa, após a explicação da 1ª etapa, que consistiu na identificação do problema, o próximo passo foi passar pela solução do problema, que se iniciou com a 2ª etapa do fluxograma de desenvolvimento da pesquisa.

2ª Etapa – Definir variáveis de entrada, saída, objetivos e restrições

A solução a ser direcionada pelo modelo foi a quantidade de FCs a ser alocada, em cada CD, que é consequência da quantidade de cirurgias previstas a serem atendidas em cada CD. O modelo é composto por dois objetivos:

- Maximizar “Demanda a ser Atendida”.
- Maximizar “Receita a ser Gerada”.

Neste contexto, trata-se de um problema multiobjetivo, em que os dois objetivos citados se comportam de forma conflitante pela diferença de preços entre SCs. Para ilustrar o conflito mencionado entre os objetivos, se o objetivo principal for maximizar o atendimento da demanda, o modelo deverá direcionar o atendimento de duas cirurgias que gerem a receita de R\$ 10, em vez de atender uma cirurgia que gere receita de R\$ 50, com o pressuposto de que as duas cirurgias são realizadas pelos mesmos FCs.

As restrições que fazem parte do problema são:

- Restrição de inventário disponível - quantidade total de FCs a ser alocada nos CDs não pode ser maior que a quantidade disponível.
- Restrição de atendimento de demanda - a demanda de cirurgias a ser atendida, em cada CD, não pode ser maior que a demanda prevista.

A próxima etapa do fluxograma de desenvolvimento da pesquisa foi a formulação matemática do problema.

3ª Etapa – Formulação matemática do modelo

O problema modelado é composto pelos índices:

- k representando os CDs, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$.
- c representando os SCs, $c \in \{1, 2, \dots, C\}$.
- s representando os FCs, $s \in \{1, 2, \dots, S\}$.
- i representando os objetivos, $i \in \{1, 2, \dots, I\}$.

Os parâmetros do modelo são exibidos a seguir:

- D_{kc} Demanda mensal do SC c no CD k .
- CAP_{ks} Capacidade de atendimento, ou seja, a quantidade de cirurgias que o FC s consegue atender no CD k por mês.
- CS_{ks} Coeficiente de segurança de FC, para alocar quantidades extras de FC s no CD k , em função da variabilidade de demanda. Ou seja, a concentração de demanda de determinado SC, em determinado dia da semana, aumenta a necessidade dos FCs que fazem parte deste SC.
- Inv_s Inventário de FC s disponível.
- RC_{kc} Receita média gerada pelo atendimento de demanda do SC c no CD k .
- w_i Peso a ser atribuído a cada objetivo i da função multiobjetivo.
- $Comp_{cs}$ Variável binária, assumindo valor um para situações em que o FC s faz parte do SC c e 0 para situações em que o FC s não faz parte do SC c .

As variáveis do modelo são explicadas e exibidas a seguir:

- AD_{kc} Representa as variáveis de decisão do modelo, que se referem à quantidade de cirurgias referentes à previsão de demanda do SC c , a serem atendidas por mês no CD k , sendo representadas por AD_{kc} , devendo ser inteiras e positivas.
- $Aloc_{ks}$ Representa a quantidade de FCs s a serem alocados no CD k , em função das cirurgias SC c , a serem atendidas no CD k , calculada pela Equação 18,

$$Aloc_{ks} = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} \frac{AD_{ck} \times COMP_{sc} \times CS_{sk}}{CAP_{sk}} \quad (18)$$

Os componentes do modelo multiobjetivo são exibidos e explicados a seguir:

ADT Demanda total a ser atendida, representando o somatório de todas as demandas de cada SC c a serem atendidas em cada CD k . O cálculo de ADT é exibido em (19),

$$ADT = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} AD_{kc} \quad (19)$$

RCT É a receita total a ser gerada pela ADT (demanda total a ser atendida), representando o somatório de todas as receitas a serem geradas pelo atendimento de demanda de cada SC c em cada CD k . O cálculo de RCT é exibido em (20),

$$RCT = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} AD_{kc} \times RC_{kc} \quad (20)$$

n_i e p_i Variáveis auxiliares utilizadas de desvio para a função objetivo i .

f_i está associado ao cálculo dos objetivos normalizados, para cada um dos objetivos i da função multiobjetivo (ADT e RCT), sendo representado em (21), para ADT e RCT,

$$f_{ADT} = \frac{ADT - \text{Mínimo}_{ADT}}{\text{Máximo}_{ADT} - \text{Mínimo}_{ADT}} \quad (21)$$

$$f_{RCT} = \frac{RCT - \text{Mínimo}_{RCT}}{\text{Máximo}_{RCT} - \text{Mínimo}_{RCT}}$$

Após a definição de todos os parâmetros, variáveis e funções utilizadas no modelo, é apresentada, a seguir, a formulação matemática do modelo:

$$\text{Minimizar:} \quad (n_{ADT} + d_{ADT}) \times w_{ADT} + (n_{RCT} + d_{RCT}) \times w_{RCT} \quad (22)$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} AD_{ck} \leq \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} D_{ck} \quad (23)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} Aloc_{sk} \leq \sum_{s \in S} Inv_s \quad (24)$$

$$f_{ADT} + n_{ADT} - p_{ADT} = 1 \quad (25)$$

$$f_{RCT} + n_{RCT} - p_{RCT} = 1 \quad (26)$$

$$n_{ADT}, p_{ADT}, n_{RCT}, p_{RCT} \geq 0 \quad (27)$$

$$AD_{kc} \in \mathbb{N}_+ \quad (28)$$

$$w_i \in [0,1] \quad (29)$$

$$k \leq K, s \leq S, c \leq C, i \leq I \quad \forall k, \forall s, \forall c, \forall i \in \mathbb{N}^* \quad (30)$$

$$n_{ADT}, p_{ADT}, n_{RCT}, p_{RCT} \geq 0 \quad (31)$$

sendo a função objetivo representada pela Equação 22, a restrição de atendimento de demanda representada pela Equação 23, a restrição de inventário representada pela Equação 24, as restrições dos componentes do WGP representadas nas Equações 25 e 26 e as delimitações das variáveis representadas pelas Equações 27 a 31.

Para ilustrar o dimensionamento da instância considerada nesta tese, com descaracterizações de dados reais, são exibidos, na Tabela 2, os números de cada componente do modelo.

Tabela 2 – Dimensionamento do problema

Informações do Modelo	
CDs	8
Tipos de SCs	140
Tipos de FCs	325
Demanda de cirurgias previstas	4.089
FCs disponíveis	27.186
Variáveis de decisão: quantidades de SCs a serem atendidos por CD (140 SCs × 8 CDs)	1.120
Variáveis da função objetivo “Demanda a ser Atendida”	1.120
Variáveis da função objetivo “Receita a ser Gerada”	1.120
Restrições de disponibilidade de FCs	325
Restrições de atendimento de demanda	1.120

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 3 apresenta-se as demandas mensais de cada cirurgia SC em cada CD, que podem variar de 0, em situações em que não há demanda da cirurgia, até valores acima de 100

cirurgias. Cabe ressaltar que a demanda é referente ao mês específico utilizado como instância nesta tese. Ou seja, para cada mês, há uma previsão de demanda diferente.

Tabela 3 – Demanda mensal de cirurgias SC em cada CD

SC x CD	CD-1	CD-2	CD-3	...	CD-8
SC-1	10	8		...	1
SC-2		9		...	
SC-3	12		8	...	
...
SC-140		2		...	

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 4 são exibidas as composições dos SCs, dado que, para o FC fazer parte do SC, o valor na tabela de composição de SCs tem que ser igual a um. Pode ser observado que determinados FCs atendem vários SCs, sendo essa situação um dos principais complicadores práticos para se definir as quantidades de FCs a serem alocados nos CDs para maximizar a demanda e a receita a serem geradas pelo atendimento de SCs.

Tabela 4 – Composição de SCs

SC x FC	FC-1	FC-2	FC-3	...	FC-325
SC-1			1	...	
SC-2	1	1		...	1
SC-3		1		...	
...	
SC-140		1		...	1

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Outra informação importante para o modelo é a capacidade mensal de atendimento de cirurgias de cada FC em cada CD (CAP_{ks}). Os valores são exibidos na Tabela 5 e representam a capacidade mensal de atendimento de cirurgias por cada FC em cada CD. Os valores foram obtidos com base em análises de dados históricos.

Tabela 5 – Capacidade mensal de atendimento de cirurgias por FC em cada CD

(Continua)

FC x CD	CD-1	CD-2	CD-3	...	CD-8
FC-1	5	3	8	...	1
FC-2	2	5	7	...	3

Tabela 5 – Capacidade mensal de atendimento de cirurgias por FC em cada CD

(Conclusão)

FC x CD	CD-1	CD-2	CD-3	...	CD-8
FC-3	2	5	8	...	8
...
FC-140	4	2	1	...	10

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Como ilustração do impacto dessa variável no modelo, sendo a capacidade mensal de atendimento de cirurgias do FC-1 no CD-1 igual a cinco, seriam necessários dois FC-1 para atender dez cirurgias por mês no CD-1.

Outro fator que impacta na quantidade de FCs necessários, para o atendimento de demandas mensais, é a concentração de cirurgias em determinados dias. Tomando uma demanda fictícia de quatro cirurgias para o FC-2 no CD-3 e todas elas ocorrerem no mesmo dia, seriam necessários quatro FCs para o atendimento da demanda. De outra forma, se as demandas ocorressem em dias diferentes, seriam necessários menos FCs. Para tratar essa situação, são aplicados os coeficientes de segurança (CS_{ks}), calculados com base nos dados históricos e exibidos na Tabela 6, que influenciam na quantidade de FCs necessários para se atender determinada demanda.

Tabela 6 – Coeficientes de segurança de FCs em cada CD

FC x CD	CD-1	CD-2	CD-3	...	CD-8
FC-1	1	1	1	...	1
FC-2	1	4,2	4	...	5
FC-3	2	3,7	2	...	1,5
...
FC-140	1	2	1,7	...	2

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Portanto a quantidade de FCs s necessários para atender determinada cirurgia c , em um CD k , é obtida aplicando-se a Equação 33:

$$\text{Quantidade de FCs necessarios} = \frac{D_{kc} \times CS_{ks}}{CAP_{ks}} \quad (33)$$

Por fim, é exibido na Tabela 7 o espaço de busca do modelo, que consiste na demanda de cirurgias a serem atendidas de cada SC, em cada CD, que culmina na alocação dos FCs necessários para tal e na geração de receitas.

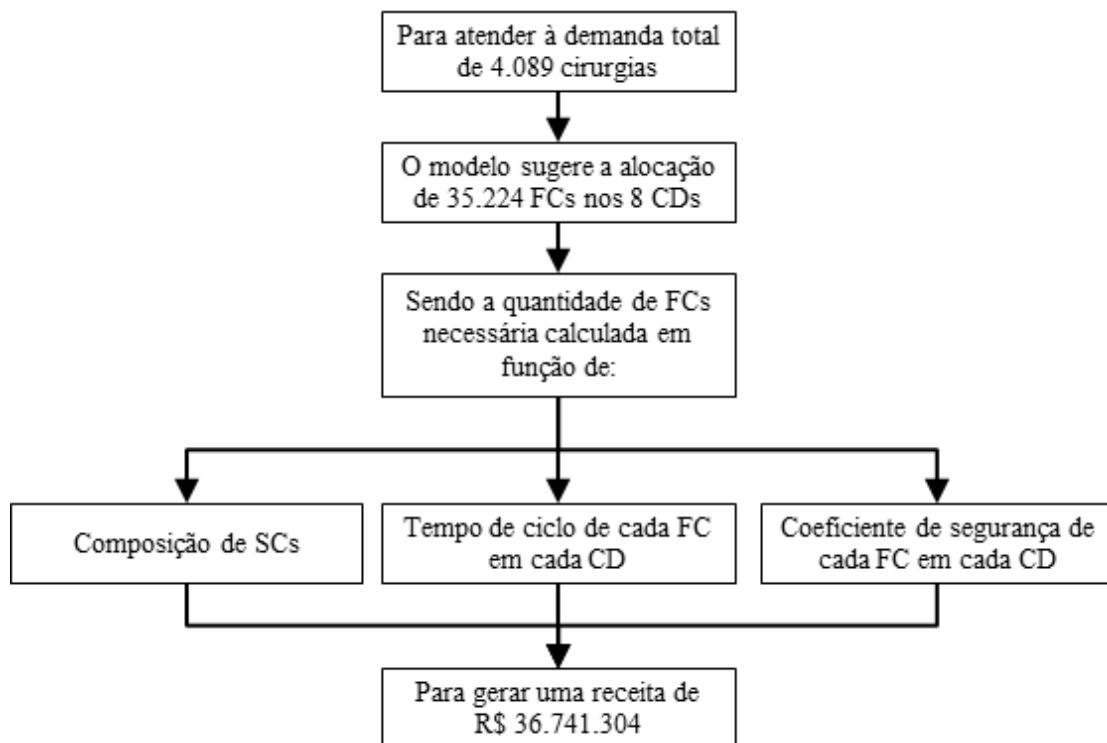
Tabela 7 – Ilustração do espaço de busca (demanda de cada SC a ser atendida em cada CD)

SC x CD	CD-1	CD-2	CD-3	...	CD-8	Receita
SC-1	10	8		...		\$500
SC-2		9		...		\$259
SC-3				...		\$23
SC-4				...		\$900
...	
SC-140		2		...		\$500

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 14, é exibido um fluxograma que ilustra a lógica de tomada de decisão do modelo, para a alocação de FCs nos CDs e, conseqüentemente, o atendimento aos objetivos de atendimento de demanda e de geração de receita.

Figura 14 – Etapas do processo decisivo guiado pelo modelo



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

A seguir são explicadas em conjunto as 4ª e 5ª etapas, por serem breves e estarem diretamente relacionadas.

4ª Etapa – Planejar Experimentos de pesos para a Função Multiobjetivo

De forma intuitiva, a primeira interpretação é que os objetivos “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada” não são conflitantes. Porém, para o negócio abordado neste trabalho, os dois objetivos são conflitantes em muitas situações. Em razão da grande diferença de receitas geradas por diferentes SCs, a alocação de determinado FC, para o atendimento de uma cirurgia referente a um SC I, pode gerar mais receita que o atendimento de dez cirurgias referentes a outro sistema cirúrgico SC II. Essa situação é ilustrada na Tabela 8 com valores fictícios, para fins didáticos.

Tabela 8 – Ilustração de competição entre os objetivos “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada”

Variável	Demanda a ser atendida	Receita a ser gerada por cirurgia	Demanda a ser atendida	Receita total a ser gerada
Atendimento de SC I	10	10	Maior	Menor
Atendimento de SC II	1	200	Menor	Maior

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Para avaliação do comportamento conflitante dos objetivos que compõem o modelo, foram planejados experimentos pela metodologia Taguchi, considerando como fatores os pesos de cada objetivo. São exibidos na Tabela 9 os níveis planejados para cada fator.

Tabela 9 – Níveis dos fatores utilizados nos experimentos

Fator	Nível 1	Nível 2	Nível 3
w_{ADT}	1%	25%	75%
w_{RCT}	1%	25%	75%

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Sendo w_{ADT} o peso do componente “Demanda a ser Atendida” e w_{RCT} o peso do componente “Receita a ser Gerada”.

Na Tabela 10 são exibidos os nove experimentos planejados, seguindo o Arranjo Taguchi.

Tabela 10 – Planejamento de experimentos Taguchi com níveis iniciais

Experimento	Nível w_{ADT}	Nível w_{RCT}	Valor w_{ADT}	Valor w_{RCT}
1	1	1	1%	1%
2	1	2	1%	25%
3	1	3	1%	75%
4	2	1	25%	1%
5	2	2	25%	25%
6	2	3	25%	75%
7	3	1	75%	1%
8	3	2	75%	25%
9	3	3	75%	75%

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Como pode ser observado na Tabela 10, para alguns experimentos o somatório dos pesos dos objetivos é diferente de 1. De forma a se ter uma melhor visibilidade da proporcionalidade e do impacto esperado pelos pesos dos objetivos em cada experimento, os pesos dos objetivos foram proporcionalmente recalculados, de forma a se garantir que em todos os experimentos o somatório seja igual a 1. Os pesos recalculados são exibidos na Tabela 11, sendo esses os valores utilizados nas execuções dos experimentos.

Tabela 11 – Planejamento de experimentos Taguchi com níveis calculados

Experimento	Nível w_{ADT}	Nível w_{RCT}	Valor w_{ADT}	Valor w_{RCT}
1	1	1	50%	50%
2	1	2	4%	96%
3	1	3	1%	99%
4	2	1	96%	4%
5	2	2	50%	50%
6	2	3	25%	75%
7	3	1	99%	1%
8	3	2	75%	25%
9	3	3	50%	50%

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Como pode ser observado na Tabela 11, foram planejados experimentos com valores iguais para w_{ADT} e w_{RCT} (experimentos 1, 5 e 9), com priorização elevada para w_{ADT}

(experimento 7), com priorização elevada para w_{RCT} (experimento 3), e com demais níveis de priorização, encontrados nos demais experimentos. Com esse planejamento de experimentos realizados, espera-se que os resultados permitam avaliar o nível de conflito entre os objetivos “Receita a ser Gerada” e “Demanda a ser Atendida”.

Na próxima etapa são exibidos os resultados dos experimentos executados.

5ª Etapa – Executar os Experimentos planejados na etapa 4

Por se tratar de modelo de Programação Linear, não há variabilidade nos resultados providos pelo modelo. Deste modo, é esperado que os resultados dos experimentos 1, 5 e 9 sejam iguais.

Conforme descrito na Seção 1.4, o modelo foi formulado em Python, e a resolução foi realizada por meio da biblioteca Pyomo e o solver GLPK. Para garantir resposta em tempo computacional viável, trabalhou-se com o parâmetro “*mipgap*” igual a 5%, o que indica que os resultados obtidos estão a 5% da solução ótima. Os resultados dos experimentos são exibidos na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados dos experimentos Taguchi

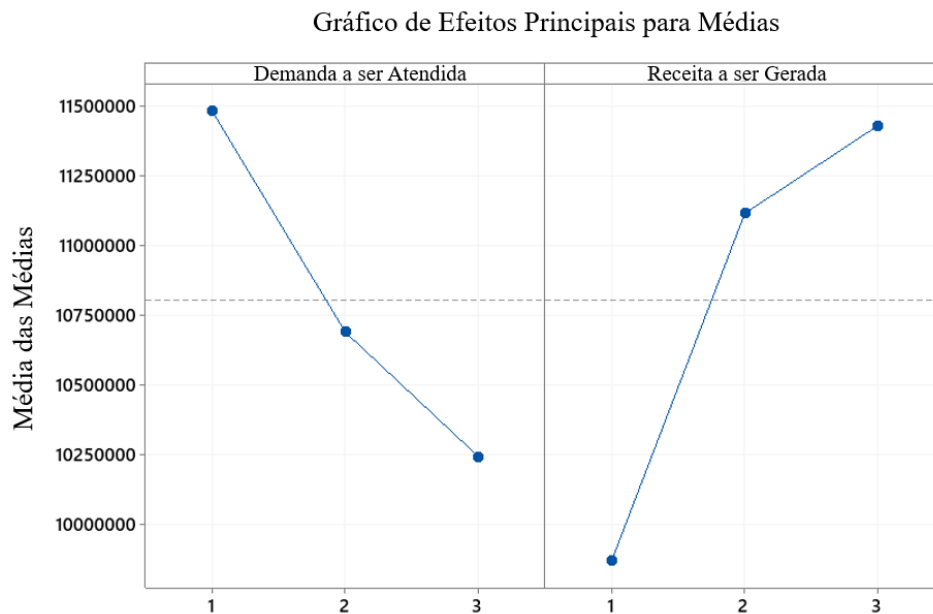
Experimento	w_{ADT}	w_{RCT}	Atendimento Demanda	Receita (R\$ milhões)	Tempo Execução (horas)
1	50%	50%	1.770	22,3	0,6
2	4%	96%	1.655	23,3	7,6
3	1%	99%	1.640	23,3	9,8
4	96%	4%	1.877	18,9	0,2
5	50%	50%	1.770	22,3	0,6
6	25%	75%	1.715	23,0	5,0
7	99%	1%	1.869	18,1	0,4
8	75%	25%	1.857	21,1	0,4
9	50%	50%	1.770	22,3	0,6

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Como pode ser observado na Tabela 12, em uma análise inicial, percebe-se que os diferentes pesos utilizados nos experimentos, implicaram em diferentes resultados.

Na Figura 15 é exibido o gráfico de efeitos principais para médias, referente aos resultados dos experimentos Taguchi. Pode ser observado que, na medida em que os níveis dos pesos são priorizados para os diferentes objetivos, os efeitos principais para as médias também alteram, evidenciando o conflito entre os objetivos:

Figura 15 – Gráfico de efeitos principais para médias



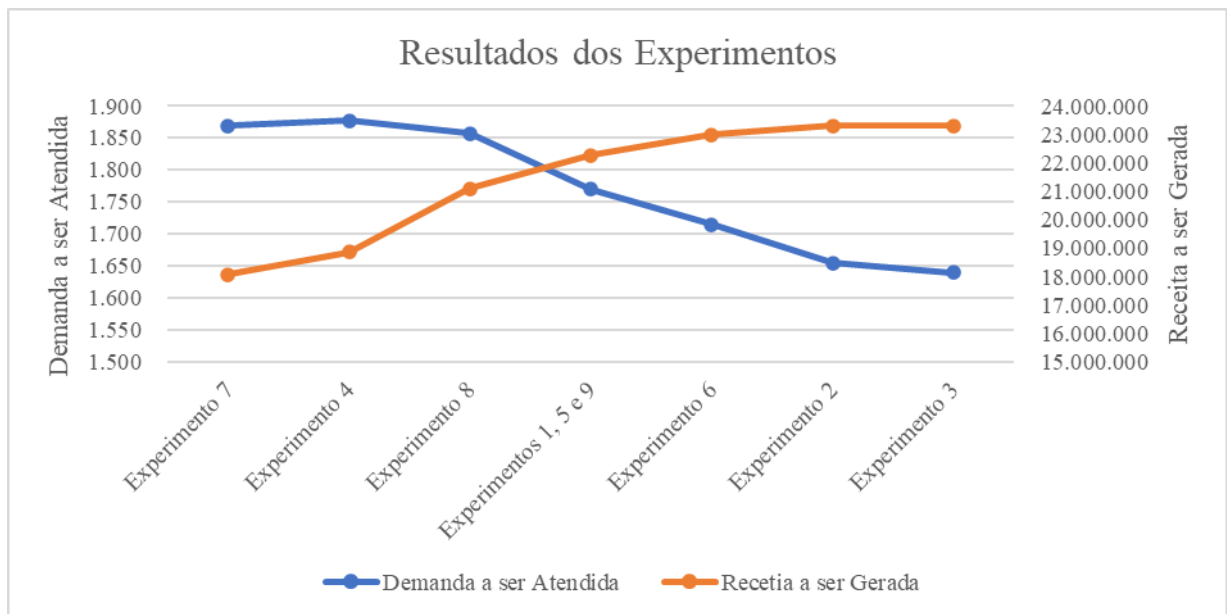
Fonte: Minitab® (2022).

A 6ª e última etapa do Fluxograma de Pesquisa consiste na análise detalhada dos resultados, bem como na explicação de implicações gerenciais, e é detalhada a seguir.

6ª Etapa – Analisar resultados providos pelo modelo ao negócio

Para ilustrar o conflito entre os objetivos “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada”, é exibido na Figura 16 o gráfico com resultados obtidos por meio das execuções dos experimentos. A exibição dos resultados está ordenada em função dos pesos dos objetivos, com o experimento 7, à esquerda, tendo o maior peso para “Demanda a ser Atendida”, e o experimento 3, à direita, com o menor peso para “Demanda a ser Atendida” e, conseqüentemente, maior peso para “Receita a ser Gerada”:

Figura 16 – Resultados dos experimentos Taguchi



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 13, são exibidos os resultados e os pesos de cada objetivo, referentes aos experimentos de Taguchi, ranqueados em função dos pesos dos objetivos.

Tabela 13 – Resultados dos experimentos Taguchi ranqueados

Experimento	w_{ADT}	w_{RCT}	Atendimento Demanda	Receita (R\$ milhões)
Experimento 7	99%	1%	1.869	18,1
Experimento 4	96%	4%	1.877	18,9
Experimento 8	75%	25%	1.857	21,1
Experimentos 1, 5 e 9	50%	50%	1.770	22,3
Experimento 6	25%	75%	1.715	23,0
Experimento 2	4%	96%	1.655	23,3
Experimento 3	1%	99%	1.640	23,3

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Como pode ser observado na Figura 16 e Tabela 13, à medida em que se alteram os pesos de priorização dos objetivos “Receita a ser Gerada” e “Demanda a ser Atendida”, ambos resultados alteram, sendo evidente o conflito entre os objetivos.

É possível observar maior sensibilidade, em relação aos pesos dos objetivos para “Receita a ser Gerada”, em comparação com “Demanda a ser Atendida”. Assim, identifica-se as

Variações de resultados do Experimento 7 (maior prioridade para demanda) em relação ao Experimento 3:

- Variação de “Receita a ser Gerada” = $\frac{(23.300.754-18.073.093)}{18.073.093} = +28,9\%$
- Variação de “Demanda a ser Atendida” = $\frac{(1.640-1.869)}{1.869} = -12,3\%$

Além das validações estatísticas, cabe ressaltar implicações dos resultados ao negócio, sendo a flexibilidade, para a priorização dos diferentes objetivos, muito importante. Para diferentes priorizações dos objetivos, foram obtidos resultados diferentes de “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada” para determinadas cirurgias. Para melhor ilustrar os impactos das priorizações dos objetivos, serão realizadas comparações envolvendo o Experimento 7, com maior priorização de “Demanda a ser Atendida” ($w_{ADT} = 0,99$), Experimento 1, com pesos iguais para os dois objetivos ($w_{ADT} = 0,5$) e o Experimento 3, com maior priorização de “Receita a ser Gerada” ($w_{ADT} = 0,01$).

Na sequência são exibidas, na Tabela 14, situações em que a “Demanda a ser Atendida”, para determinados SCs no CD-1, sofreram acréscimo ou decréscimo, em função de diferentes priorizações dos componentes da função multiobjetivo, comprovando assim o impacto prático dos pesos dos objetivos para o modelo abordado nesta tese.

Tabela 14 – Comparações de “Demanda a ser Atendida” para diferentes pesos dos objetivos

Sistema Cirúrgico	$w_{ADT} = 0,01$	$w_{ADT} = 0,5$	$w_{ADT} = 0,99$	Tendência
SC-53	24	35	42	↑ Acréscimo
SC-122	0	36	49	↑ Acréscimo
SC-57	17	1	0	↓ Decréscimo
SC-98	3	2	0	↓ Decréscimo

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Como pode ser observado na Tabela 14, à medida que o peso da “Demanda a ser Atendida” aumenta, observam-se acréscimos de “Demanda a ser Atendida” pelos SCs 53 e 122. São também encontradas situações de decréscimos, como pode ser observado para os SCs 57 e 98. Essas diferentes situações, de acréscimos e decréscimos, são causadas por situações em que diferentes SCs, com diferentes demandas e receitas, competem pelos mesmos FCs.

Uma situação comum e complexa para a empresa é a alocação de FCs que fazem parte de vários SCs. O FC-313, por exemplo, faz parte de 60 SCs diferentes. São exibidos, na Tabela 15, os resultados da alocação do FC-313, nos CDs 1, 4 e 7, nos quais é possível observar

tendências de acréscimo e decréscimo na alocação de FCs, à medida em que as prioridades dos objetivos são alteradas pelos pesos dos objetivos.

Tabela 15 – Alocação do FC-313 nos CDs 1, 4 e 7

CD	$w_{ADT} = 0,01$	$w_{ADT} = 0,5$	$w_{ADT} = 0,99$	Tendência
CD-1	24	28	34	↑ Acréscimo
CD-4	22	19	12	↓ Decréscimo
CD-7	13	11	9	↓ Decréscimo

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Podem ser observados, na Tabela 15, o acréscimo de alocação do FC-313 no CD-1 e os decréscimos nos CDs 4 e 7, à medida em que se aumenta o peso da “Demanda a ser Atendida”. Essas situações, provavelmente, foram causadas pelo conflito entre os objetivos “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada” entre os SCs com demandas nos CDs citados. Para os demais CDs, não foram observadas tendências de acréscimo ou decréscimo de alocações ou de cirurgias a serem atendidas pelo FC-313.

Outro importante impacto ao negócio é a qualidade dos resultados providos pelo modelo, que acarretam decisões mais bem direcionadas. Para se comparar resultados das alocações de FCs, seguindo recomendações do modelo com resultados previstos sem otimização, serão comparados os seguintes cenários:

- Cenário sem otimização - Neste cenário, foram considerados os resultados provenientes da solução inicial aleatória, que mais se assemelha à prática realizada, antes do desenvolvimento do modelo, pois as decisões eram tomadas sem considerar simultaneamente variáveis importantes e sem estarem plenamente baseadas em análises de dados.
- Cenário 1 - resultados esperados pelas alocações dos FCs sugeridas pelo modelo de otimização com w_{ADT} igual a 0,99 (priorização do objetivo “Demanda a ser Atendida”).
- Cenário 2 - resultados esperados pelas alocações dos FCs sugeridas pelo modelo de otimização com w_{ADT} igual a 0,5 (sem priorização de objetivos).
- Cenário 3 - resultados esperados pela alocação dos FCs sugerida pelo modelo de otimização com w_{ADT} igual a 0,01 (priorização do objetivo “Receita a ser Gerada”).

Na Tabela 16 são exibidos os resultados de “Receita a ser Gerada”, “Demanda a ser Atendida” e “FCs alocados”, para os quatro cenários citados, com variações em percentual dos resultados para os cenários otimizados, em comparação com o cenário sem otimização.

Tabela 16 – Resultados com e sem otimização

	Receita a ser gerada	Demanda a ser atendida	FCs alocados
Cenário sem otimização	R\$ 13.754.664	1.527	13.901
Otimização Cenário 1	R\$ 18.073.093 ↑31%	1.869 ↑22%	14.207 ↑2%
Otimização Cenário 2	R\$ 22.276.671 ↑62%	1.770 ↑16%	15.246 ↑10%
Otimização Cenário 3	R\$ 23.300.754 ↑69%	1.640 ↑7%	15.895 ↑14%

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Como pode ser observado na Tabela 16, os cenários otimizados (cenários 1, 2 e 3) apresentam resultados melhores tanto para “Receita a ser Gerada” como para “Demanda a ser Atendida” em comparação com o “cenário sem otimização”. Também é possível observar uma menor quantidade de FCs alocados, no cenário sem otimização, comprovando menor utilização da capacidade disponível.

Conforme evidenciado na 6ª etapa do Fluxograma de Pesquisa, foram evidenciados conflitos entre os objetivos “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada”, bem como diferentes decisões direcionadas, na medida em que se altera os pesos que compõem a Função Objetivo (w_{ADT} e w_{RCT}).

No próximo Capítulo são apresentadas as implicações gerenciais providas pelo uso do modelo proposto e implementado.

4 IMPLICAÇÕES GERENCIAIS

O modelo desenvolvido passou a ser utilizado para a tomada da importante e complexa decisão de alocação de ferramentais cirúrgicos ortopédicos nos CDs de forma mais assertiva, tendo como principal objetivo para o negócio a maximização do atendimento de demanda e de geração de receita. Decisões antes tomadas, repletas de incertezas, passaram a ser suportadas por uma ferramenta confiável, que considera diversos fatores e variáveis importantes e provê resultados de boa qualidade para uma tomada de decisão mais assertiva.

São listados, a seguir, os principais benefícios garantidos à empresa objeto de estudo por meio do modelo desenvolvido:

- Menos tempo demandado e maior assertividade na alocação de FCs entre CDs.
- Aumento do atendimento de demanda e de geração de receita por meio da aplicação das decisões direcionadas pelo modelo.
- Decisões antes tomadas repletas de incertezas, agora, passam por um processo robusto, que leva em consideração os principais fatores simultaneamente.
- Bons resultados obtidos no Brasil levaram à replicação do modelo em filiais de outros países.

No Capítulo 3, referente à descrição e modelagem do problema, foram evidenciadas situações que comprovam alto impacto gerencial provido pelo modelo. Na Tabela 16 – Resultados com e sem otimização (página 62), referente aos resultados com e sem otimização, podem ser observados aumentos significativos, para “Receita a ser Gerada” (31% a 69%), “Demanda a ser Atendida” (7% a 22%) e também em relação à quantidade de FCs a serem alocados (2% a 14%), que evidenciam projeções de melhores resultados para a empresa, bem como melhor utilização dos FCs disponíveis.

Outra situação de grande importância para o negócio, apresentada pelos resultados do modelo, é a evidência do conflito entre os objetivos “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada”. Tal situação foi comprovada, dentre outras explicações pelo gráfico da Figura 16, que exhibe os valores dos objetivos “Receita a ser Gerada” e “Demanda a ser Atendida”, para diferentes priorizações dos objetivos. É possível observar que, à medida que o peso para o objetivo “Demanda a ser Atendida” é priorizado, os resultados para o objetivo “Demanda a ser Atendida” melhoram e, para “Receita a ser Gerada”, pioram. Sendo assim, o tomador de decisão pode definir combinações de pesos, de acordo com a priorização do negócio, em relação aos objetivos “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada”.

Também foi possível visualizar os impactos gerados nas alocações de FCs nos CDs e atendimento de demanda de SCs, em função de diferentes priorizações nos objetivos, nas Tabelas 14 – Comparações de “Demanda a ser Atendida” para diferentes pesos dos objetivos (página 60), e 15 – Alocação do FC-313 nos CDs 1, 4 e 7 (página 61). Portanto os pesos dos objetivos impactam as principais decisões guiadas pelo modelo, que são: demanda de SCs a serem atendidas, receitas a serem geradas e definição de alocação de FCs nos CDs. Cabe, então, ao tomador de decisão realizar as comparações e definir qual situação mais se adequa aos objetivos da empresa. É importante ressaltar que o objetivo “Demanda a ser Atendida” é o mais importante para a empresa.

Os resultados do modelo podem indicar também quais FCs estão em excesso (quantidades de FCs disponíveis, que não foram alocados pelo modelo) e quais FCs estão em falta (quantidades de FCs que tiveram sua totalidade alocada nos CDs), sendo uma importante informação para o direcionamento de compras de FCs. Para saber exatamente a quantidade de cada FC necessária, para atender a demanda total prevista, basta executar o modelo com a restrição de inventário disponível desativada e comparar a quantidade de FCs com alocações sugeridas pelo modelo com a quantidade de FCs disponíveis atualmente na empresa.

Outra decisão gerencial importante direcionada pelo modelo é a alocação de FCs excedentes (FCs que não tiveram alocações sugeridas). Uma vez que determinado FC tem sua alocação sugerida, em diferentes CDs para atendimento de cirurgias, os FCs excedentes podem ser proporcionalmente alocados nestes CDs, em função das quantidades de FCs alocadas pelo modelo, de forma a garantir maior segurança em relação à disponibilidade de inventários para atendimento de demandas atípicas (demandas fora do planejado).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Este capítulo é composto pelas respostas às questões de pesquisa, levantadas na Seção 1.1, verificação do cumprimento dos objetivos, levantados na Seção 1.3, conclusões desta tese e propostas para futuras pesquisas.

5.1 RESPOSTA ÀS QUESTÕES DE PESQUISA E OBJETIVOS

Iniciando pelas questões de pesquisa, a primeira listada na Seção 1.1 (“Como direcionar a alocação de Ferramentais Cirúrgicos Ortopédicos (FCs) nos Centros de Distribuição (CDs), de forma a se maximizar a “Demanda a ser Atendida” e a “Receita a ser Gerada?”). Essa questão de pesquisa foi atendida pela execução de todo o fluxograma de desenvolvimento da pesquisa, exibido na Figura 7 – Bibliometria para “Multiobjective Optimization” (página 28), desde a identificação do problema (etapa 1) até a análise de aderência dos resultados providos pelo modelo ao negócio (etapa 6).

De forma mais detalhada, a resposta à primeira questão de pesquisa consistiu no entendimento dos problemas de negócio enfrentados pela empresa objeto de estudo, desenvolvimento de modelo de auxílio à tomada de decisão para melhor direcionamento das alocações de FCs nos CDs e, por fim, na análise de aderência dos resultados providos pelo modelo ao negócio.

A segunda questão de pesquisa (“Os conflitos existentes entre os objetivos “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada” são significativos?”) foi respondida, por meio da conclusão das etapas 4 a 5 do fluxograma de desenvolvimento da pesquisa, pois foi possível avaliar quantitativamente as relações conflitantes entre os objetivos “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada”, por meio das análises dos resultados obtidos por meio das execuções dos experimentos planejados pelo Arranjo de Taguchi, envolvendo os pesos dos dois objetivos.

Por fim, a terceira e última questão de pesquisa (“Quais os impactos esperados em relação ao atendimento de demanda e geração de receita ao se utilizar um modelo de alocação de recursos como auxílio à tomada de decisão em uma empresa de FCs?”) foi respondida, por meio da conclusão da etapa 6 do fluxograma de desenvolvimento da pesquisa. Nesta etapa, foram evidenciados os impactos positivos do modelo ao negócio, ao se comparar resultados com e sem otimização, exibidos na Tabela 16 – Resultados com e sem otimização (página 62). Esta questão também foi respondida pelas análises dos impactos dos pesos dos objetivos na

“Demanda a ser Atendida” (Tabela 14 – Comparações de “Demanda a ser Atendida” para diferentes pesos dos objetivos, página 60) e nas alocações de FCs (Tabela 15 – Alocação do FC-313 nos CDs 1, 4 e 7, página 61), permitindo que o tomador de decisão avalie diferentes cenários com alterações nos pesos dos objetivos.

Passando pelos objetivos, o objetivo geral, definido na Seção 1.3, foi “Desenvolver um modelo de auxílio à tomada de decisão para um problema real de alocação de ativos ortopédicos em Centros de Distribuição, de forma a se maximizar a “Demanda a ser Atendida” e a “Receita a ser Gerada””. O objetivo geral foi atendido, uma vez que foi desenvolvido um modelo para auxílio à tomada de decisão referente à alocação de ativos ortopédicos em CDs, com modelagem e resolução por meio de Programação Linear. Os resultados obtidos se mostraram aderentes ao negócio, e com melhora expressiva na eficiência do processo.

Em relação aos objetivos específicos, o primeiro objetivo específico (“Desenvolver um modelo multiobjetivo para problema de alocação de FCs em CDs”) foi atendido ao se formular um modelo multiobjetivo utilizando a metodologia WGP, com a função multiobjetivo composta pelos objetivos “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada”.

O segundo objetivo específico, “Identificar as vantagens dos resultados da otimização do modelo de Programação Matemática (PM), para o problema de alocação de ativos ortopédicos”, foi plenamente atendido, uma vez que os resultados obtidos com otimização, para os três cenários com diferentes composições de pesos para “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada”, foram melhores em comparação com os resultados sem otimização, conforme evidenciado na Tabela 16 – Resultados com e sem otimização (página 62). Detalhadamente, os resultados para os três cenários foram melhores em relação à “Demanda a ser Atendida”, “Receita a ser Gerada” e à quantidade de FCs alocados, em comparação com o cenário sem otimização.

O terceiro e último objetivo específico, “Realizar análise de sensibilidade dos pesos durante o processo de otimização multiobjetivo por meio do Arranjo de Taguchi”, teve seu atendimento comprovado na etapa 6 do fluxograma de desenvolvimento da pesquisa de pesquisa (“Analisar aderência dos resultados providos pelo modelo ao negócio”), na qual foram realizadas diversas análises quantitativas dos impactos ao negócio em função de diferentes combinações de pesos, ao rodar o modelo de otimização, com a função multiobjetivo modelada por meio de WGP. Por meio da aplicação do Arranjo de Taguchi, foi possível gerar cenários com conflitos entre os objetivos “Demanda a ser Atendida” e “Receita a ser Gerada”,

permitindo que o tomador de decisão possa escolher o melhor cenário, de acordo com os objetivos da empresa.

5.2 PROPOSTAS PARA FUTURAS PESQUISAS

Propostas para futuras pesquisas são listadas a seguir:

- Desenvolver modelo de priorização de compras de FCs, considerando determinado CAPEX como restrição, com o objetivo de maximizar retorno sobre investimento, gerando uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão importante para a empresa.
- Resolver o modelo aplicando outros métodos de otimização.
- Replicar modelo em outros problemas de alocação de recursos, atrelados à área de saúde.

REFERÊNCIAS

- ACAR, Z. Y.; BASCIFTCI, F. Solving multi-objective resource allocation problem using multi-objective binary artificial bee colony algorithm. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 46, p. 8535–8547, 2021.
- ARECTOUT, A.; BOUKHAL, H.; CHAKIR, E.; GARCIA, M. A.; GARCIA, F. OS.; AZAHRA, M.; MAKHLOUL, M.; AZOUGAGH, M.; YAAKOUBI, H. E.; ZIDOUH, I.; SUAREZ, V. M. Optimization of the n-type HPGe detector parameters using the “design of experiments” technique. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 189, Dez 2021.
- AUDET, C.; BIGEON, J.; CARTIER, D.; DIGABEL, S.; SALOMON, L. Performance indicators in multiobjective optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 292, p. 397-422, Jul 2021.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 22, p. 241-264, 2002.
- BOVIN, S. R.; NAESS, H. R. **A stochastic dynamic programming approach to the bidding problem in the intraday electricity market**. Department of Industrial Economics and Technology Management of Norwegian University of Science and Technology, Jun 2018.
- BRYMAN, A.; BELL, E. **The nature of quantitative research**. **Business Research Methods**. New York. Oxford University, p. 154-177, 2007.
- CHANG, C. T. Multi-choice goal programming. **The International Journal of Management Science**, vol 35, p. 389-396, 2007.
- CHANG, C. T. Revised multi-choice goal programming. **Applied Mathematical Modelling**, v. 32, p. 2587-2595, 2008.
- CINAR, A.; SALMAN, F. S.; BOZKAYA, B. Prioritized single nurse routing and scheduling for home healthcare services. **European Journal of Operational Research**, 2019.
- DAGUM, P.; LUBY, M. Approximating probabilistic inference in Bayesian belief networks is NP-hard. **Artificial Intelligence**, v. 60, p. 141-153, Mar 1992.
- DEEPANRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V.; JAYARAJ, S. Multi-response optimization of process parameters in biogas production from food waste using Taguchi – Grey relational analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 141, p. 429–438, 2017.
- DEEPIKA, M. M.; ONKAR, A. K. Multicriteria optimization of variable thickness plates using adaptive weighted sum method. **Sadhana**, v. 46, Abr 2021.
- DIAS, J. M.; ROCHA, H.; VIANA, A.; LANDA, P.; SONNESSA, M.; TAFANI, E.; TESTI, A. Multiobjective bed management considering emergency and elective patient flows. **International Transactions in Operational Research**, v. 25, p. 91-110, 2018.

DURAKOVIC, B. Design of experiments application, concepts, examples: state of the art. **Periodicals of Engineering and Natural Sciences**, v. 5, p. 421-439, Dez 2017.

EMMERICH, M. T. M.; DEUTZ, A. H. A tutorial on multiobjective optimization: fundamentals and evolutionary methods. **Natural Computing**, v.17(3), p. 585(25), 2018.

GABRIEL, G. T.; CAMPOS, A. T.; MAGACHO, A. L.; SEGISMONTI, L. C.; VILELA, F. F.; QUEIROZ, J. A.; MONTEVECHI, J. A. B. Lean thinking by integrating with discrete event simulation and design of experiments: an emergency department expansion. **Computer Science**, Ago 2020.

GONG, Y.; ZHANG, J.; CHUNG, H. S.; CHEN, W. N.; ZHAN, Z.; LI, Y.; SHI, Y. An efficient resource allocation scheme using particle swarm optimization. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 16, p. 801-816, Dec 2012.

HAMANI, W. **Application of operations research to healthcare industry in developing countries. Case study: optimization of the location of primary health care centers in Tunisia.** Master's degree dissertation, BSM - Pompeu Fabra University, 2019.

HERNANDEZ, F.; CARELLO, G.; LANZARONE, E. An optimization tool to dimension innovative home health care services with devices and disposable materials. **Flexible Services and Manufacturing Journal**, v. 32, Set 2020.

HUANG, C.; YUNZHI, J.; YEH, W. H. W. Solving cold-standby reliability-redundancy allocation problems with particle-based simplified swarm optimization. **Journal of sensors**, 2021.

JIANG, Y.; HAO, K.; CAI, X.; DING, Y. An improved reinforcement-immune algorithm for agricultural resource allocation optimization. **Journal of Computational Science**, v. 27, p. 320–328, 2018.

KANAKARIS, N. K.; GIANNOUDIS, P. V. Trauma networks: present and future challenges. **Journal of Translational Medicine**, 2011.

KARSU, O.; MORTON, A. Trading off health and financial protection benefits with multiobjective optimization. **Health Economics**, Out 2020.

KIM, I. Y.; WECK, O. L. Adaptive weighted-sum method for bi-objective optimization: Pareto front generation. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 29, p. 149–158, 2005.

KURTH, M.; KEISLER, J. M.; BATES, M. E.; BRIDGES, T. S.; SUMMERS, J. LINKOV, I. A portfolio decision analysis approach to support energy research and development resource allocation. **Energy Policy**, 2017.

LEONARDI, A. **Prótese de joelho: quem deve ser submetido?** Disponível em: <https://adrianoleonardi.com.br/artigos/protese-do-joelho-quem-deve-ser-submetido>. Acesso em: 23 jun.2021.

- LIN, C. K. Y.; LING, T. W.; YEUNG, W. K. Resource allocation and outpatient appointment scheduling using simulation optimization. **Journal of Healthcare Engineering**, v. 2017, p. 9034737, 2017.
- MACCHIETTO, G. F. S. Model-based design of experiments for parameter precision: state of the art. **Chemical Engineering Science**, v. 63, p. 4846-4872, Out 2008.
- MACKENZIE, S. **5 things you probably don't know about getting a hip replacement**. Disponível em: <https://www.drstuartmackenzie.com.au/blog/5-things-you-probably-dont-know-about-getting-a-hip-replacement/>. Acesso em: 23 jun. 2021.
- MAO, X.; JIANG, X.; YUAN, C.; ZHOU, J. Modeling the optimal maintenance scheduling strategy for bridge networks. **Applied Sciences**, v. 10(2), p. 498, 2020.
- MARLER, R. T.; ARORA, J. S. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 26, p. 369–395, 2004.
- MEIGNAN, D.; KNUST, S.; FRAYRET, J.; PESANT, G.; GAUD, N. A review and taxonomy of interactive optimization methods in operations research. **ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems**, Out 2015.
- MIGUEL, P. A. C.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N.; LIMA, E. P.; TURRIONI, J. B.; HO, L. L.; MORABITO, R.; COSTA, S. E. G.; MARTINS, R. A.; SOUZA, R.; PUREZA, V. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Campus Ltda, 2010.
- MINITAB. **Software estatístico**. Disponível em: <https://www.minitab.com>. Acesso em: 20 jan. 2022.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. John Wiley & Sons, ed. 8, 2013.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. Editora Wiley, ed. 9, 2019.
- NAGARAJ, T.; RAJKUMAR, M.; MURALIDHARAN, K. Selection of optimum parameter for compression testing based on design of experiments using Taguchi method. **Annals of Operations Research**, v. 304, Set 2021.
- PIETRANTUONO, R. On the testing resource allocation problem: research trends and perspectives. **Journal of Systems and Software**, v. 161, Mar 2020.
- PRIYAN, S. Operations Research in Healthcare: a Review. **Juniper Online Journal of Public Health**, 2017.
- RODRIGUEZ, C.; GARAIX, T.; XIE, X.; AUGUSTO, V. Staff dimensioning in homecare services with uncertain demands. **International Journal of Production Research**, p. 7396-7410, 2015.

ROMÃO, E. L.; LUZ, E.; GOMES, J. H.; SEBASTIÃO, C. Optimization of the resistance spot welding process of 22MnB5-galvannealed steel using response surface methodology and global criterion method based on principal components analysis. **Metals**, v. 10, 2020. SCOPUS. **Base de dados bibliográficos**. Disponível em: <https://www.scopus.com>. Acesso em: 14 mar. 2022.

SHI, X.; ZHENG, R.; LIN, Z.; YANG, T.; YAN, G. An exponentially convergent distributed algorithm for resource allocation problem. **Asian Journal of Control**, v. 23, p. 1072-1082, Abr 2020.

SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S. Literature review on deterministic and under uncertainty goal programming models. **Sicelo**, 2015.

SILVA, A. F. **Uma sistemática para incorporar as incertezas em problemas experimentais do tipo metodologia da superfície de resposta por meio da otimização via simulação Monte Carlo**. Tese de Livre Docência FEG - UNESP, 2019.

SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S.; DIAS, E. X.; OLIVEIRA, J. B. S. Modeling the uncertainty in response surface methodology through optimization and Monte Carlo simulation: an application in stamping process. **Materials & design**, v. 173, Jul 2019.

SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S.; OLIVEIRA, J. B. S.; DIAS, E. X. Multi-objective optimization and finite element method combined with optimization via Monte Carlo simulation in a stamping process under uncertainty. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 117, p. 305-327, Nov 2021.

SOMMA, M. **Optimal operation planning of distributed energy systems through multi-objective approach: a new sustainability-oriented pathway**. Tese na Università di Napoli Federico II - Dipartimento di Ingegneria Industriale, Mar 2016.

TAMIZ, M.; JONES, D. F.; El-Darzi, E. A review of goal programming and its applications. **Annals of Operations Research**, v. 58, p. 39-53, 1995.

TAMIZ, M.; JONES, D.; ROMERO, C. Goal programming for decision making: an overview of the current state-of-the-art. **European Journal of Operational Research**, v. 111, p. 569-581, 1998.

VETTER, T. R.; UHLER, L. M.; BOZIC, K. J. Value-based healthcare: preoperative assessment and global optimization (pass-go): improving value in total joint replacement care. **Clinical Orthopedics and Related Research**, v. 475(8), p.1958-1962, 2017.

VOLLAND, A. F.; BRUNNER, J. O. A column generation approach for the integrated shift and task scheduling problem of logistics assistants in hospitals. **European Journal of Operational Research**, v. 260, p. 316-334, 2017.

WANG, R.; ZHOU, Z.; ISHIBUCHI, H.; LIAO, T.; ZHANG, T. Localized weighted sum method for many-objective optimization. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 22, no. 1, p. 3-18, Fev 2018.

WEB OF SCIENCE. **Base de dados bibliográficos**. Disponível em: <http://login.webofknowledge.com>. Acesso em: 14 mar. 2022.

WEI, F.; ZHANG, X.; XU, J.; BING, J.; PAN, G. Simulation of water resource allocation for sustainable urban development: an integrated optimization approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, Nov 2020.

WU, J.; CHEN, B.; WU, D.; WANG, J.; PENG, X.; XU, X. Optimization of markov queuing model in hospital bed resource allocation. **Journal of healthcare engineering**, 2020.

YAGHOUBI, M. A.; TAMIZ, M. A. A. Tolerance approach to the fuzzy goal programming problems with unbalanced triangular membership function. **European Journal of Operational Research**, v. 176, p. 636-640, 2007.

YOUSEFI, M.; FERREIRA, R. P. M. An agent-based simulation combined with group decision-making technique for improving the performance of an emergency department. **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**, v. 50, 2017

YOUSEFI, M.; YOUSEFI, M. Human resource allocation in an emergency department. **Emerald**, Mar 2019.

ZAERPOUR, F.; BISCHAK, D. P.; MENEZES, M. B. C. Coordinated lab-clinics: a tactical assignment problem in healthcare. **European Journal of Operational Research**, v. 263, p. 283-294, 2017.

ZHANG, C.; YANG, T. Optimal maintenance planning and resource allocation for wind farms based on non-dominated sorting genetic algorithm-II. **Renewable Energy**, v. 164, p. 1540-1549, Fev 2021.

ZITZLER, E.; KNOWLES, J.; THIELE, L. Quality assessment of Pareto set approximations. **In Multiobjective optimization**, 2008.