
**Otimização multiobjetivo aplicada ao
planejamento de dietas para portadores de
diabetes**

Thiago Fernandes Soares



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Uberlândia
2023

Thiago Fernandes Soares

**Otimização multiobjetivo aplicada ao
planejamento de dietas para portadores de
diabetes**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação da Faculdade de Computação da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Área de concentração: Ciência da Computação

Orientador: Paulo Henrique Ribeiro Gabriel

Coorientador: Maurício Cunha Escarpinati

Uberlândia

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S676o
2023 Soares, Thiago Fernandes, 1996-
Otimização multiobjetivo aplicada ao planejamento de dietas para portadores de diabetes [recurso eletrônico] / Thiago Fernandes Soares. - 2023.

Orientador: Paulo Henrique Ribeiro Gabriel.

Coorientador: Maurício Cunha Escarpinati.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.5005>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Computação. I. Gabriel, Paulo Henrique Ribeiro, 1984-, (Orient.). II. Escarpinati, Maurício Cunha, 1976-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação. IV. Título.

CDU: 681.3

André Carlos Francisco
Bibliotecário Documentalista - CRB-6/3408



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da
Computação

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1A, Sala 243 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG,
CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4470 - www.ppgco.facom.ufu.br - cpgfacom@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Ciência da Computação				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 5/2024, PPGCO				
Data:	24 de janeiro de 2024	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	15:30
Matrícula do Discente:	12022CCP007				
Nome do Discente:	Thiago Fernandes Soares				
Título do Trabalho:	Otimização multiobjetivo aplicada ao planejamento de dietas para portadores de diabetes				
Área de concentração:	Ciência da Computação				
Linha de pesquisa:	Inteligência Artificial				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	-				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação, assim composta:
Professores Doutores: Maurício Cunha Escarpinati- (coorientador)FACOM/UFU, Alessandra Aparecida Paulino- FACOM/UFU, Kelly Cristina Poldi - IMECC/Unicamp e Paulo Henrique Ribeiro Gabriel- FACOM/UFU, orientador do candidato.

Os examinadores participaram desde as seguintes localidades: Kelly Cristina Poldi - Campinas/SP e Alessandra Aparecida Paulino- Monte Carmelo/MG. Os outros membros da banca e o aluno participaram da cidade de Uberlândia.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof . Dr. Paulo Henrique Ribeiro Gabriel, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos,

conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Henrique Ribeiro Gabriel, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/01/2024, às 17:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alessandra Aparecida Paulino, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/01/2024, às 17:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mauricio Cunha Escarpinati, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/01/2024, às 17:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Kelly Cristina Poldi, Usuário Externo**, em 25/01/2024, às 09:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5095692** e o código CRC **3604DD43**.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de expressar minha sincera gratidão a Deus, por me guiar e me dar força ao longo desta jornada acadêmica. Estendo meus agradecimentos mais calorosos à minha família e amigos, cujo apoio incondicional e incentivo constante foram fundamentais para o meu avanço e bem-estar. Minha gratidão é imensa ao Prof. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Gabriel pela orientação esclarecedora e sabedoria compartilhada, e ao Prof. Dr. Maurício Cunha Escarpinati, pela coorientação e contribuições valiosas que foram essenciais para o desenvolvimento deste estudo. Um agradecimento especial é devido à Profa. Dra. Carolina Ribeiro Xavier, da Universidade Federal de São João del-Rei, por fornecer dados cruciais que possibilitaram a elaboração dos modelos desta dissertação. A todos, meu mais profundo respeito e apreço por serem parte integrante desta realização.

Resumo

Diabetes mellitus (DM) é uma doença crônica caracterizada pela falta ou má absorção do hormônio insulina. Seu tratamento inclui, entre outras estratégias, a adoção de uma dieta equilibrada, com baixo teor de glicose. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é gerar, automaticamente, dietas otimizadas para indivíduos portadores de DM, focando na minimização de nutrientes críticos como carboidratos e lipídeos. Para abordar os objetivos conflitantes de redução de carboidratos e limitação de lipídeos, foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira multiobjetivo. Este modelo demonstrou eficácia ao atender às necessidades nutricionais específicas de pacientes, mantendo um equilíbrio entre a redução de carboidratos e a incorporação de alimentos com menor teor de gorduras. Essa abordagem oferece uma solução prática e viável na dietética e nutrição clínica para o manejo do diabetes, garantindo variedade alimentar ao longo dos dias da semana.

Palavras-chave: Diabetes mellitus; Programação linear inteira; Otimização multiobjetivo; Planejamento de dieta.

Abstract

Diabetes mellitus (DM) is a chronic disease characterized by lack or malabsorption of hormonal insulin. Its treatment includes, among other strategies, adopting a balanced diet low in glucose. In this sense, this work aims to automatically generate optimized diets for individuals with DM, focusing on minimizing critical nutrients such as carbohydrates and lipids. To address conflicting goals of reducing carbohydrates and limiting lipids, a multi-objective integer linear programming model has been developed. This model has demonstrated effectiveness in meeting specific nutritional needs of patients while maintaining a balance between reducing carbohydrates and incorporating foods with lower fat content. This approach provides a practical and viable solution in clinical dietetics and nutrition for diabetes management, ensuring dietary variety throughout the week.

Keywords: Diabetes mellitus; Integer linear programming; Multiobjective optimization; Diet planning.

Lista de tabelas

Tabela 1 – Recomendações nutricionais para portadores de diabetes mellitus. . . .	39
Tabela 2 – Itens presentes em cada refeição	45
Tabela 3 – Perfil alimentar de três indivíduos hipotéticos	48
Tabela 4 – Alimentos resultantes para cada indivíduo no primeiro modelo	49
Tabela 5 – Comparação dos valores nutricionais para três indivíduos	50
Tabela 6 – Funções Objetivo	51
Tabela 7 – Distribuição dos alimentos obtida pelo Experimento 1 para os três indivíduos	53
Tabela 8 – Comparação dos valores nutricionais do Experimento 1 para os três indivíduos.	54
Tabela 9 – Distribuição dos alimentos obtidos pelo Experimento 1 para o I1 em três dias.	55
Tabela 10 – Resultado para a dieta obtida pelo primeiro modelo para o I1 para três dias.	56
Tabela 11 – Distribuição dos alimentos gerados no Experimento 2 para os três indivíduos	58
Tabela 12 – Comparação dos valores nutricionais obtidos no Experimento 2 para os três indivíduos	59
Tabela 13 – Distribuição dos alimentos gerados no Experimento 2 para o I1 em três dias	60
Tabela 14 – Resultado para a dieta obtida no Experimento 2 para o I1 para três dias	61
Tabela 15 – Distribuição dos alimentos gerados no Experimento 3 para os três indivíduos	63
Tabela 16 – Comparação dos valores nutricionais obtidos no Experimento 3 para os três indivíduos	64
Tabela 17 – Distribuição dos alimentos gerados no Experimento 3 para o I1 em três dias	65
Tabela 18 – Resultado para a dieta obtida no Experimento 3 para o I1 para três dias	66

Tabela 19 – Distribuição dos alimentos gerados no Experimento 4 para os três indivíduos	68
Tabela 20 – Comparação dos valores nutricionais obtidos no Experimento 4 para os três indivíduos	69
Tabela 21 – Distribuição dos alimentos gerados no Experimento 4 para o I1 em três dias	70
Tabela 22 – Resultado para a dieta obtida no Experimento 4 para o I1 para três dias	71
Tabela 23 – Resultados apresentados por Silva et al. (2017b) e comparação com o modelo desenvolvido	75
Tabela 24 – Resultados para o I1 utilizando o método da soma ponderada dos dias 1 ao 3	78
Tabela 25 – Resultados para o I1 utilizando o método da soma ponderada dos dias 4 e 5	79
Tabela 26 – Resultado dos nutrientes para o I1 utilizando o método da soma ponderada	79
Tabela 27 – Resultados para o I2 utilizando o método da soma ponderada dos dias 1 ao 3	80
Tabela 28 – Resultados para o I2 utilizando o método da soma ponderada dos dias 4 e 5	81
Tabela 29 – Resultado dos nutrientes para o I2 utilizando o método da soma ponderada	81
Tabela 30 – Resultados para o I3 utilizando o método da soma ponderada dos dias 1 ao 3	82
Tabela 31 – Resultados para o I3 utilizando o método da soma ponderada dos dias 4 e 5	83
Tabela 32 – Resultado dos nutrientes para o I3 utilizando o método da soma ponderada	83
Tabela 33 – Resultados para o I1 utilizando o método lexicográfico dos dias 1 ao 3 .	85
Tabela 34 – Resultados para o I1 utilizando o método lexicográfico dos dias 4 e 5 .	86
Tabela 35 – Resultado dos nutrientes para o I1 utilizando o método lexicográfico . .	86
Tabela 36 – Resultados para o I2 utilizando o método lexicográfico dos dias 1 ao 3 .	87
Tabela 37 – Resultados para o I2 utilizando o método lexicográfico dos dias 4 e 5 .	88
Tabela 38 – Resultado dos nutrientes para o I2 utilizando o método lexicográfico . .	88
Tabela 39 – Resultados para o I3 utilizando o método lexicográfico dos dias 1 ao 3 .	89
Tabela 40 – Resultados para o I3 utilizando o método lexicográfico dos dias 4 e 5 .	90
Tabela 41 – Resultado dos nutrientes para o I3 utilizando o método lexicográfico . .	91

Lista de abreviaturas e siglas

DM	Diabetes Mellitus
DM1	Diabetes Mellitus Tipo 1
DM2	Diabetes Mellitus Tipo 2
ADA	<i>American Diabetes Association</i>
PL	Programação Linear
PNL	Programação Não-Linear
PI	Programação Inteira
PLI	Programação Linear Inteira
PMI	Programação Inteira Mista
NSGA-II	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
TBCA	Tabela Brasileira de Composição de Alimentos
SBD	Sociedade Brasileira de Diabetes
CBC	<i>COIN-OR Linear Programming</i>
AG	Algoritmo Genético
ED	Evolução Diferencial

Lista de símbolos

A_j	Quantidade de porções do alimento j
$Carb_j$	Quantidade de Carboidratos, em gramas, em uma porção do alimento j
$minCarb_I$	Quantidade mínima de Carboidratos, em gramas, ingerida pelo indivíduo I
Col_j	Quantidade de Colesterol, em miligramas, em uma porção do alimento j
Na_j	Quantidade de Sódio, em miligramas, em uma porção do alimento j
$Prot_j$	Quantidade de Proteínas, em miligramas, em uma porção do alimento j
Cal_j	Quantidade de Calorias, em miligramas, em uma porção do alimento j
$minCal_I$	Quantidade mínima de Calorias, em miligramas, ingerida pelo indivíduo I
$maxCal_I$	Quantidade máxima de Calorias, em miligramas, ingerida pelo indivíduo I
Lip_j	Quantidade de Lipídeos, em gramas, em uma porção do alimento j
$maxLip_I$	Quantidade máxima de Lipídeos, em gramas, ingerida pelo indivíduo I
Fib_j	Quantidade de Fibras alimentares, em gramas, em uma porção do alimento j
Ca_j	Quantidade de Cálcio, em miligramas, em uma porção do alimento j
Mg_j	Quantidade de Magnésio, em gramas, em uma porção do alimento j

P_j	Quantidade de Fósforo, em miligramas, em uma porção do alimento j
Fe_j	Quantidade de Ferro, em miligramas, em uma porção do alimento j
K_j	Quantidade de Potássio, em miligramas, em uma porção do alimento j
Zn_j	Quantidade de Zinco, em miligramas, em uma porção do alimento j
Va_j	Quantidade de Vitaminas A, em microgramas, em uma porção do alimento j
Vt_j	Quantidade de Vitaminas B1, em miligramas, em uma porção do alimento j
Vr_j	Quantidade de Vitaminas B2, em miligramas, em uma porção do alimento j
Vc_j	Quantidade de Vitaminas C, em miligramas, em uma porção do alimento j
$Custo_j$	Preço em Real do alimento j

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	Diabetes mellitus	23
2.2	Otimização matemática	25
2.3	Otimização multiobjetivo	27
2.3.1	Método da Soma Ponderada	27
2.3.2	Método Lexicográfico	28
3	TRABALHOS CORRELATOS	31
3.1	Otimização de dietas para portadores de diabetes	31
3.2	Outros modelos de otimização de dietas	34
3.3	Considerações finais	35
4	MODELOS PROPOSTOS	37
4.1	Primeiro modelo: Minimização de carboidratos	38
4.2	Segundo modelo: Otimização multiobjetivo	42
4.3	Terceiro modelo: Otimização multiobjetivo com organização em refeições	44
5	EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	47
5.1	Base de dados e perfis nutricionais	47
5.2	Primeiro Modelo	49
5.3	Segundo Modelo	50
5.3.1	Experimento 1: Minimização de carboidratos, lipídios e colesterol	51
5.3.2	Experimento 2: Minimização de carboidratos e da combinação de lipí- dios e colesterol	56
5.3.3	Experimento 3: Minimização de carboidratos, lipídios, colesterol e custo	61

5.3.4	Experimento 4: Minimização de carboidratos, custo e da combinação de lipídeos e colesterol	66
5.3.5	Discussão sobre o segundo modelo	71
5.4	Terceiro Modelo	72
5.4.1	Comparação com a literatura	73
5.4.2	Experimento envolvendo o método da soma ponderada	76
5.4.3	Experimento envolvendo o método lexicográfico	84
6	CONCLUSÕES	93
	Referências	95

Introdução

O Diabetes Mellitus (DM), ou simplesmente diabetes, é uma doença crônica caracterizada pela hiperglicemia resultante de defeitos na secreção ou na ação da insulina e representa um dos mais significativos desafios de saúde pública do século XXI (Castro et al., 2021). O diabetes não só afeta o metabolismo da glicose, mas também pode levar a complicações debilitantes, atingindo todos os sistemas orgânicos do corpo humano (Silva et al., 2020).

O aumento da prevalência global do diabetes tem sido impulsionado por uma combinação de fatores demográficos, como o envelhecimento populacional, e mudanças nos padrões alimentares e no estilo de vida, levando a um aumento no consumo de alimentos processados e na redução de atividades físicas (Louzada et al., 2021). Essas tendências têm contribuído substancialmente para o crescimento da incidência do diabetes tipo 2, que representa a maioria dos casos de diabetes em todo o mundo (IDF, 2021)¹.

Atualmente, estima-se que cerca de 463 milhões de adultos vivem com diabetes do tipo 2, com projeções indicando um aumento para até 700 milhões até o ano de 2045 (IDF, 2021). Diante de tais números e do potencial da doença para provocar complicações graves, torna-se importante desenvolver estratégias eficazes de prevenção e gestão dessa doença. Nesse contexto, destaca-se a importância da adoção de uma dieta restritiva com quantidade controlada de nutrientes. De fato, a composição nutricional de cada alimentos é um fator determinante para um bom controle glicêmico e impedimento de hiperglicemias crônicas (Filippo et al., 2021; Graça; Jesus, 2023). Assim, a otimização dietética emerge como uma ferramenta vital para o manejo efetivo da doença.

A literatura existente revela uma variedade de abordagens para o planejamento dietético em diabetes (Bas, 2014; Dhoruri et al., 2017; Ahourag et al., 2022). Esses trabalhos, geralmente, empregam modelos de otimização matemática que fornecem informações sobre a criação de dietas que não apenas se alinham com as restrições nutricionais, mas

¹ Ao contrário do diabetes tipo 1, que é uma doença autoimune em que o corpo não produz insulina suficiente, o tipo 2 geralmente se desenvolve ao longo do tempo e está associado a fatores de risco modificáveis (ADA, 2018)

também consideram as preferências e o custo dos alimentos, oferecendo um plano alimentar balanceado e economicamente viável para diabéticos. Porém, ainda são poucos os trabalhos que se adaptam à diversidade alimentar disponível no Brasil (Paulino, 2017; Silva et al., 2020).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo de otimização matemática que permita encontrar uma dieta adequada para portadores de diabetes, respeitando as demandas nutricionais mínimas e máximas exigidas. Além da adequação nutricional, o modelo proposto visa a praticidade e adaptabilidade das dietas no dia a dia dos indivíduos afetados por essa condição crônica.

Esse trabalho se iniciou com o desenvolvimento de um modelo mono-objetivo, focado na minimização de carboidratos. Posteriormente, o modelo foi estendido até se chegar em uma formulação multiobjetivo, considerando outros nutrientes, além de integrar preferências individuais e a variação diária de alimentos. Essa progressão refletiu uma resposta direta às limitações encontradas, cada etapa incorporando novos elementos e refinando a abordagem para atender melhor às necessidades dos pacientes.

O modelo desenvolvido neste trabalho permite estruturar dietas por refeições e mantém um sistema de penalidades que garante a diversidade alimentar ao longo de diferentes dias. Busca-se, assim, facilitar a adesão dos pacientes às dietas propostas, ao mesmo tempo em que atende aos rigorosos critérios nutricionais exigidos para o controle eficaz do diabetes.

Além disso, ao considerar metas específicas de carboidratos e lipídeos, o modelo também incorpora a complexa interação entre esses macronutrientes. É importante destacar que esses objetivos podem entrar em conflito, especialmente em um contexto de restrição de carboidratos. Nesse cenário, a minimização de carboidratos pode levar à seleção de alimentos mais ricos em gorduras, a fim de suprir as necessidades energéticas. No entanto, esse comportamento pode potencializar os riscos associados à ingestão excessiva de gorduras, como o aumento do colesterol e o desenvolvimento de doenças cardiovasculares. Portanto, o desafio reside em encontrar um equilíbrio adequado entre esses objetivos, levando em consideração não apenas as necessidades nutricionais individuais, mas também os potenciais impactos na saúde a longo prazo. Essa abordagem holística é fundamental para garantir que as dietas propostas sejam não apenas eficazes no controle do diabetes, mas também seguras e sustentáveis para os pacientes.

O restante desta monografia está estruturado como se segue. No Capítulo 2, apresenta-se as características e implicações do diabetes mellitus, bem como nos métodos de otimização matemática e otimização multiobjetivo. Este capítulo fornece a base científica e os conceitos matemáticos que sustentam os modelos de otimização desenvolvidos posteriormente. O Capítulo 3 examina trabalhos correlatos, oferecendo uma perspectiva crítica sobre as metodologias e resultados de estudos anteriores na área de otimização de dietas para diabéticos.

Já nos Capítulos 4 e 5, são apresentados os modelos propostos e a análise dos re-

sultados experimentais. Inicialmente, é descrito o desenvolvimento do modelo focado na minimização de carboidratos; em seguida, detalha-se os modelos mais complexos e abrangentes, que incorporam múltiplos objetivos e considerações práticas para a formulação das dietas. Os resultados desses modelos são apresentados e discutidos, enfatizando tanto os sucessos alcançados quanto as limitações encontradas. Por fim, o Capítulo 6 conclui o trabalho, resumindo as principais contribuições do estudo, propondo direções para pesquisas futuras e destacando a produção bibliográfica que emergiu deste estudo. As referências citadas ao longo da dissertação são compiladas em seguida.

Referencial Teórico

Neste capítulo, são explorados os principais conceitos necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, na Seção 2.1, discute-se sobre o Diabetes Mellitus (DM), condição crônica que não apenas afeta a qualidade de vida de diversos indivíduos, como também impõe desafios aos sistemas de saúde em todo mundo. Em seguida, na Seção 2.2, discute-se sobre a otimização matemática, um campo que fornece as ferramentas analíticas necessárias para enfrentar problemas complexos de decisão e planejamento. A otimização matemática é pertinente no contexto de formulação de dietas para diabéticos, pois diversas variáveis e restrições nutricionais precisam ser equacionadas para alcançar um regime alimentar ideal. Finalmente, na Seção 2.3, aborda-se o conceito de otimização multiobjetivo, que permite a negociação entre objetivos concorrentes, frequentemente encontrados em problemas do mundo real.

2.1 Diabetes mellitus

O Diabetes Mellitus (DM) é amplamente reconhecido como um dos principais problemas de saúde global (Castro et al., 2021). Esta doença metabólica crônica caracterizada predominantemente pela hiperglicemia, que ocorre devido a anormalidades na produção e/ou função da insulina, um hormônio essencial para a regulação da glicose sanguínea (Fowler, 2010). Esta desregulação no metabolismo da glicose pode ter consequências a longo prazo, afetando quase todos os sistemas orgânicos e levando a complicações severas e, muitas vezes, fatais (Fowler, 2010; Filippo et al., 2021).

A incidência do DM tem aumentado dramaticamente nas últimas décadas. Segundo a Federação Internacional do Diabetes (IDF, 2021), estima-se que aproximadamente 463 milhões de adultos em todo o mundo têm diabetes, um número que se prevê que aumente para 700 milhões até 2045. Estas estatísticas, combinadas com o potencial da doença para causar complicações graves, como doença cardiovascular, cegueira e insuficiência renal, evidenciam que o DM não é apenas um desafio clínico, mas também uma preocupação significativa em saúde pública.

O aumento na prevalência do DM é influenciado por vários fatores, incluindo mudanças na dieta, padrões de atividade física, crescimento populacional e envelhecimento. Além disso, o aumento do consumo global de alimentos processados ricos em açúcares e gorduras, juntamente com estilos de vida mais sedentários, tem contribuído significativamente para a pandemia do DM, especialmente do tipo 2, que representa a maioria dos casos globais (Zimmet et al., 2001).

O DM não é uma condição única, mas sim uma coleção de distúrbios metabólicos com características em comum, principalmente a hiperglicemia (Fowler, 2010). Compreender os diferentes tipos de DM é essencial para diagnosticar, tratar e gerir eficazmente a doença. Os principais tipos de DM são (Fowler, 2010; Castro et al., 2021):

1. **Diabetes Mellitus Tipo 1 (DM1):** O DM1 é uma doença autoimune na qual o sistema imunológico ataca e destrói as células beta produtoras de insulina no pâncreas. A causa exata desta resposta autoimune ainda é objeto de pesquisa, mas acredita-se que uma combinação de fatores genéticos e ambientais, possam influenciar em seu desenvolvimento (Atkinson et al., 2014). Costuma surgir rapidamente, geralmente durante a infância ou adolescência, mas pode aparecer em qualquer idade. Os sintomas incluem sede excessiva, micção frequente, fome, perda de peso, fadiga e visão turva.
2. **Diabetes Mellitus Tipo 2 (DM2):** O DM2 é caracterizado pela resistência à insulina e eventual declínio na produção desse hormônio. Fatores genéticos, obesidade, estilo de vida sedentário e dieta inadequada são considerados principais causadores do DM2 (Sladek et al., 2007). Geralmente a DM2 surge na idade adulta, embora a incidência em jovens esteja aumentando. Os sintomas podem ser semelhantes ao DM1, mas geralmente são menos pronunciados e podem ser negligenciados por anos.
3. **Diabetes Gestacional:** Essa forma da doença aparece em mulheres grávidas que não têm histórico de diabetes, mas que apresentam alta glicose no sangue durante a gravidez. É provavelmente desencadeada por hormônios da gravidez que bloqueiam a ação da insulina da mãe, resultando em resistência a esse hormônio (ADA, 2018). O diabetes gestacional é geralmente detectado durante os exames de rotina na gravidez. A maioria das mulheres não apresenta sintomas, embora algumas possam experimentar sintomas típicos de diabetes.

Além dessas três formas mais comuns, existem outros tipos mais raros de DM, como os causados por mutações genéticas específicas, doenças do pâncreas, medicamentos ou infecções. Essas manifestações são mais raras e têm características e tratamentos específicos. É fundamental destacar que, embora essas categorias definam tipos específicos de DM, cada paciente é único e a doença pode variar amplamente dentro dessas categorias.

Os tratamentos e as abordagens de gestão precisam ser individualizados para atender às necessidades específicas de cada paciente.

O diabetes quando não gerenciado adequadamente, pode levar a uma série de complicações crônicas, que afetam quase todos os sistemas do corpo. Essas complicações podem ser classificadas em macrovasculares e microvasculares. A gestão do DM é um processo contínuo e multifacetado que visa manter os níveis de glicose no sangue dentro dos limites recomendados, minimizando o risco de complicações associadas. Esta gestão envolve uma combinação de mudanças no estilo de vida, monitorização regular e, em muitos casos, medicação.

As intervenções no estilo de vida no tratamento do DM vêm em primeiro lugar. Nesse contexto, uma dieta adequada é essencial para o controle glicêmico. A *American Diabetes Association* (ADA) recomenda uma abordagem individualizada para a dieta, com ênfase em alimentos ricos em nutrientes e baixos em gordura e calorias (Evert et al., 2019). Além disso, o exercício físico regular é crucial, não só para o controle glicêmico, mas também para melhorar a saúde cardiovascular e a sensação de bem-estar (Colberg et al., 2016).

A monitorização da glicose no sangue é uma ferramenta essencial na gestão do DM. Para pacientes com DM tipo 1, ou aqueles com DM tipo 2 em terapia insulínica, a monitorização frequente é fundamental para ajustar a dosagem de insulina e prevenir episódios de hipoglicemia ou hiperglicemia (ADA, 2019).

No que diz respeito à medicação, a escolha do tratamento farmacológico depende do tipo de DM. No DM tipo 1, a insulina é essencial, uma vez que o pâncreas não produz insulina suficiente (Atkinson et al., 2014). Já no DM tipo 2, a terapia pode começar com agentes orais como metformina, que aumenta a sensibilidade à insulina e diminui a produção hepática de glicose (Bailey; Turner, 1996). Se os agentes orais não forem suficientes, a insulina ou outros agentes injetáveis podem ser adicionados.

Além do controle glicêmico, é crucial gerir fatores de risco cardiovascular associados, como hipertensão e dislipidemia, devido ao aumento do risco de complicações macrovasculares em pacientes diabéticos (Cosentino et al., 2020).

Portanto, a educação do paciente é uma componente crítica da gestão do DM, permitindo que os pacientes tomem decisões informadas sobre sua saúde e participem ativamente de sua própria gestão (Funnell; Anderson, 2004).

2.2 Otimização matemática

A otimização matemática, também conhecida como programação matemática, é um ramo da matemática aplicada que se dedica a encontrar a melhor solução possível para um problema, levando em consideração restrições e objetivos específicos (Arenales et al., 2015). Problemas de otimização surgem em diversas áreas, como Computação, Engenharia e Economia, e o desenvolvimento de métodos de solução tem sido de interesse

de pesquisadores das mais diversas áreas. A natureza e a complexidade desses problemas também variam consideravelmente, levando ao desenvolvimento de uma variedade de técnicas e abordagens ao longo das décadas.

A otimização envolve a modelagem de decisões, sob a forma de funções matemáticas, e a busca pelo valor ótimo dessas funções. Essas funções são formuladas de modo a refletir o objetivo do problema em questão (Arenales et al., 2015). Formalmente, um problema de otimização tem a seguinte forma (Boyd; Vandenberghe, 2004):

$$\begin{aligned} & \text{minimizar} && f(x) \\ & \text{sujeito a} && g_i(x) \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m. \end{aligned} \tag{1}$$

Aqui, o vetor $x = (x_1, \dots, x_n)$ representa o conjunto das variáveis de decisão do problema, $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ é a função objetivo, $g_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $i = 1, \dots, m$, são as restrições do problema e as constantes b_1, \dots, b_m são os limites das restrições. Um vetor x^* é chamado solução ótima do problema (1) se ele possuir o menor valor objetivo entre todos os vetores que satisfazem as restrições, ou seja, se para qualquer z com $g_1(z) \leq b_1, \dots, g_m(z) \leq b_m$, temos $f(z) \geq f(x^*)$.

Dependendo do domínio de sua função objetivo ou de suas restrições, um problema de otimização pode ser classificado em diferentes categorias. Algumas das mais conhecidas são (Luenberger; Ye, 2008; Arenales et al., 2015; Macambira et al., 2023):

Programação Linear (PL): Lida com problemas de otimização em que as relações entre as variáveis são representadas por funções lineares (Luenberger; Ye, 2008; Arenales et al., 2015). A solução ótima para um problema de PL, se existir, pertence a um dos vértices da região de soluções viáveis definida pelas restrições. Nesse sentido, o método Simplex, que itera através dos vértices da região viável, é um dos mais populares para resolver problemas de PL.

Programação Não-linear (PNL): Refere-se a problemas de otimização nos quais pelo menos uma das restrições ou a função objetivo não é linear (Luenberger; Ye, 2008). Esta categoria engloba diversos problemas que podem ser altamente complexos devido à presença de múltiplas soluções locais ótimas, o que significa que podem existir vários pontos onde o valor da função objetivo é otimizado, mas apenas um deles é o verdadeiro ótimo global.

Programação Inteira (PI): Nessa categoria estão problemas em que algumas (ou todas) as variáveis são restritas à números inteiros (Arenales et al., 2015; Macambira et al., 2023). Em alguns contextos, o termo refere-se à programação linear inteira (PLI), na qual a função objetivo e as restrições (exceto as restrições inteiras) são lineares. Finalmente, se algumas variáveis de decisão não forem inteiras, o problema é conhecido como problema de Programação Inteira Mista (PIM).

Todas essas categorias, geralmente, lidam com problemas com uma única função objetivo. Porém, nas últimas décadas, problemas com múltiplos objetivos têm se tornado cada vez mais relevantes. Isso ocorre devido à sua capacidade de abordar problemas complexos do mundo real os quais, inclusive, podem envolver conflitos entre tais objetivos. Tais problemas serão discutidos na próxima seção.

2.3 Otimização multiobjetivo

A otimização multiobjetivo, ou otimização de Pareto, lida com problemas que envolvem a otimização simultânea de mais de uma função objetivo (Deb, 2001). Esses objetivos podem ser, por exemplo, maximizar o lucro de uma empresa enquanto minimiza seu impacto ambiental ou melhorar a eficiência de um processo enquanto se reduz seu custo. Em termos matemáticos, um problema de otimização multiobjetivo é representado como:

$$\begin{aligned} &\text{minimizar} && F(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x)) \\ &\text{sujeito a} && g_i(x) \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m. \end{aligned} \tag{2}$$

em que n é o número de funções objetivo.

A meta principal da otimização multiobjetivo é modelar a importância relativa dos objetivos (Marler; Arora, 2004). Nesse sentido, os métodos de solução desses problemas são categorizados dependendo de como o decisor (o “usuário do modelo”) definirá suas preferências. Nos métodos *a priori*, o usuário indica a importância relativa das funções objetivo ou metas desejadas antes de executar o algoritmo de otimização. Já nos métodos com articulação de preferências *a posteriori*, a seleção de uma única solução de um conjunto de soluções matematicamente equivalentes é feita após a execução dos algoritmos (Marler; Arora, 2004).

No segundo caso, é comum o uso de heurísticas e meta-heurísticas que constroem um conjunto de soluções (o chamado Pareto ótimo) por meio de processos iterativos (Deb, 2001). Neste trabalho, porém, o foco é no uso de métodos *a priori*, os quais são descritos a seguir (Marler; Arora, 2004).

2.3.1 Método da Soma Ponderada

O método da soma ponderada é uma das abordagens mais tradicionais e amplamente utilizadas para tratar problemas de otimização multiobjetivo (Marler; Arora, 2004). A principal ideia desta técnica é converter o problema multiobjetivo original em uma série de problemas de otimização de um único objetivo (mono-objetivo), através da atribuição de pesos específicos para cada função objetivo.

Seja o problema de otimização (2) definido por k funções objetivo f_1, \dots, f_k . O método dos pesos constrói um problema mono-objetivo ponderado W da seguinte maneira:

$$W(x) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(x) \quad (3)$$

em que w_i , $i = 1, \dots, k$ são os pesos associados às funções objetivo e satisfazem as condições $w_i \geq 0$ e $\sum_{i=1}^k w_i = 1$. O objetivo é, então, otimizar a função objetivo ponderada $W(x)$ (Marler; Arora, 2004; Emmerich; Deutz, 2018).

Ao variar os valores dos pesos, diferentes soluções ótimas são obtidas, cada uma representando um compromisso entre os objetivos originais. Essas soluções compõem fronteira de Pareto, um conjunto de soluções nas quais a melhoria em um objetivo levará a uma deterioração em pelo menos um dos outros objetivos (Emmerich; Deutz, 2018).

Uma das críticas ao método dos pesos é que ele pode não ser capaz de gerar todo o conjunto de Pareto, especialmente em problemas com características de não convexidade. Além disso, a escolha dos pesos pode ser arbitrária e não necessariamente refletir as preferências reais do tomador de decisão (Deb, 2001). Apesar dessas limitações, o método dos pesos é apreciado por sua simplicidade e capacidade de fornecer dados valiosos sobre a natureza das compensações entre objetivos em muitos problemas práticos.

2.3.2 Método Lexicográfico

O método lexicográfico é outra das abordagens clássicas utilizadas para resolver problemas de otimização multiobjetivo (Isermann, 1982; Marler; Arora, 2004). Seu nome se origina da maneira como as palavras são ordenadas em um dicionário, isto é, lexicograficamente (Isermann, 1982).

Esse método prioriza objetivos em uma ordem hierárquica predeterminada. Seja um problema de otimização multiobjetivo com k funções objetivo f_1, f_2, \dots, f_k . Para aplicar o método lexicográfico, primeiramente, ordena-se as funções objetivo em uma sequência de prioridade, por exemplo, $f_1 \succ f_2 \succ \dots \succ f_k$. Em seguida, aplicam-se os seguintes passos:

1. Solucione o problema considerando apenas a primeira função objetivo f_1 . Identifique o valor da solução ótima, denotada como x' , e o valor ótimo dessa função, f'_1 .
2. Resolva o problema novamente, considerando agora a segunda função objetivo f_2 , mas com uma restrição adicional: $f_i(x) \leq f'_i$ (ou $f_1(x) \geq f'_1$ no caso de maximização). Identifique a solução ótima para f_2 , mantendo f_1 em seu valor ótimo, e assim por diante.
3. O processo é repetido para todas as funções objetivo, adicionando, a cada etapa, uma restrição que mantém as soluções anteriores em seus valores ótimos.

Embora o método lexicográfico apresente uma estrutura clara e direta de resolução, ele pode não refletir adequadamente as preferências do tomador de decisão, já que a escolha da ordem de prioridade das funções é muitas vezes arbitrária (Isermann, 1982; Sherali;

Soyster, 1983; Marler; Arora, 2004). Adicionalmente, uma pequena alteração em uma função objetivo de alta prioridade pode levar a grandes mudanças nas funções objetivo de menor prioridade.

Dadas suas características, o método lexicográfico é frequentemente utilizado em situações onde a hierarquia entre os objetivos é clara e justificável. Em problemas reais, a aplicabilidade deste método deve ser cuidadosamente ponderada (Marler; Arora, 2004).

Trabalhos Correlatos

O problema da seleção de dieta ótima pode ser considerado um dos mais antigos dentro da Pesquisa Operacional (Stigler, 1945; McCann-Rugg et al., 1983; Dantzig, 1990). De fato, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos, tendo como foco questões como: minimização de custo financeiro da dieta, minimização de calorias ou gorduras, maximização de um determinado nutriente, entre outros objetivos (Xavier et al., 2023).

No contexto da otimização de dietas para portadores de diabetes, muitos trabalhos focam na obtenção de modelos mais precisos, enquanto outros combinam técnicas de otimização com sistemas inteligentes, de modo a tratar questões específicas. Na próxima seção, são descritos trabalhos relacionados a esse tema. Além disso, na Seção 3.2, são apresentados outros estudos que trouxeram modelos e abordagens utilizadas no desenvolvimento desta pesquisa.

3.1 Otimização de dietas para portadores de diabetes

Em um trabalho seminal, McCann-Rugg et al. (1983) propuseram um modelo de otimização linear, considerando tanto as recomendações dietéticas quanto as preferências alimentares dos pacientes. No entanto, devido a limitações tecnológicas, o trabalho se limitou a um conjunto pequeno de alimentos e o foco da pesquisa foi no tempo ganho pela abordagem proposta em relação a outros métodos não matemáticos. Tal abordagem, porém, serviria de base para diversos trabalhos mais modernos.

Bas (2014), por exemplo, propôs um modelo de programação inteira mista (PIM) para esse problema, utilizando os valores da carga glicêmica dos alimentos como parâmetros da função objetivo. O modelo busca identificar um plano alimentar que atende às necessidades diárias de nutrição e tamanho das porções, ao mesmo tempo em que minimiza os valores totais diários da carga glicêmica dos alimentos consumidos. Cabe ressaltar que os valores de carga glicêmica estão sujeitos a incertezas, de modo que a abordagem proposta considera variabilidades.

O modelo foi avaliado de maneira experimental com base em exigências nutricionais, tamanho de porções e grupos alimentares básicos recomendados por órgãos de saúde dos Estados Unidos. Os resultados evidenciam que o modelo proposto é capaz de formular planos alimentares que cumpram os requisitos diários, minimizando a carga glicêmica diária total. O modelo também proporciona ao tomador de decisão a capacidade de ajustar o grau de incerteza para alcançar o nível desejado de precisão (Bas, 2014).

De maneira similar, Eghbali-Zarch et al. (2017) introduziu um novo modelo de otimização multiobjetivo de programação linear inteira mista para a elaboração de planos alimentares destinados a portadores de diabetes em um contexto de incerteza. O modelo visa proporcionar dietas nutricionalmente adequadas, diversificadas e economicamente eficientes para portadores de diabetes, levando em consideração variáveis como o índice de massa corporal, altura, níveis de atividade física e requisitos nutricionais. A abordagem proposta também considerou paladar, disponibilidade e custo dos alimentos, assegurando que cada paciente possa selecionar alimentos apropriados de acordo com suas preferências individuais.

O modelo foi desenvolvido combinando o Método de Jiménez (Jiménez, 1996) e o Método ε -constraint (Bérubé et al., 2009) a fim de apresentar o Pareto ótimo de soluções não dominadas. As metas deste modelo foram minimizar a quantidade total de gordura saturada, açúcar e colesterol, bem como o custo total dos planos alimentares. As restrições do modelo contemplam atender às necessidades nutricionais do corpo e controlar a diversidade da dieta de cada paciente. A fim de se aproximar da realidade, parâmetros difusos foram incorporados ao modelo.

Os resultados evidenciaram que foi possível elaborar dietas nutricionalmente adequadas, diversificadas e economicamente eficientes para pacientes diabéticos, levando em consideração variáveis como índice de massa corporal, altura, níveis de atividade física e requisitos nutricionais. O modelo pode ser adaptado para diferentes faixas etárias ou condições médicas mediante ajustes nos parâmetros (Eghbali-Zarch et al., 2017).

Já o trabalho de Dhoruri et al. (2017) utilizou um modelo de programação por metas (Jones; Tamiz, 2010), visando determinar as melhores variações de cardápios para portadores de diabetes. O modelo considerou a quantidade de calorias, proteínas, gorduras e carboidratos, além do custo financeiro. O modelo se baseia em premissas específicas, como o fato de os pacientes não apresentarem complicações nem outras doenças crônicas. Além disso, o cardápio gerado é exclusivo para condição de peso normal e para pacientes que não estão em processo gestacional.

Os autores detalham, ainda, os conteúdos nutricionais do cardápio dietético, que se constituem majoritariamente de carboidratos, proteínas e gorduras. Especialistas em nutrição de um hospital forneceram uma fórmula para determinar a quantidade de energia, carboidratos, proteínas e gorduras necessárias para pacientes com DM. O cardápio gerado é discutido, no artigo, com base nas diretrizes do hospital (Dhoruri et al., 2017).

Outro trabalho que merece destaque, levando em consideração a realidade brasileira, é o de Paulino (2017), que propôs a resolução desse problema por meio de um modelo matemático de programação linear. A autora considerou 60 alimentos diferentes tanto crus quanto cozidos, além de derivados, de modo a possibilitar uma ampla variedade de alimentos e atender características gerais da alimentação brasileira dispondo também de alimentos regionais. Os dados nutricionais desses alimentos foram obtidos a partir da versão 5.0 da Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TBCA) da Universidade de São Paulo (USP).

Foram realizadas três simulações, considerando três indivíduos hipotéticos distintos, para a elaboração de dietas diárias, não havendo restrições de uso de um mesmo alimento em dias ou refeições diferentes. A função objetivo do modelo proposto visa unicamente a minimização do consumo de carboidratos. Após a execução do modelo, os alimentos obtidos foram organizados, manualmente, em três refeições diárias (café da manhã, almoço e jantar).

Seguindo uma abordagem heurística, Sun e Wang (2009) apresentaram um modelo de otimização multiobjetivo para a dieta de pacientes diabéticos. Os autores buscaram minimizar o consumo de gordura, proteínas e carboidratos e empregaram um algoritmo evolutivo denominado NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*) (Deb et al., 2002) para gerar o conjunto Pareto ótimo. Resultados experimentais mostraram que o algoritmo pode resolver eficazmente os problemas de otimização nutricional de pacientes diabéticos e fornecer aos criadores de dietas um suporte à decisão nutricional. No entanto, os autores não detalharam quais alimentos foram considerados.

Ainda nesse contexto, Prilianti et al. (2017) utilizaram um sistema imunológico artificial (Dasgupta; Niño, 2008) para propor dietas para indivíduos diabéticos, tendo como base alimentos típicos da Indonésia. Os autores consideraram idade, sexo, peso, altura e tipo de atividade principal de cada paciente, coletando cerca de 200 receitas de refeições que foram divididas entre café da manhã, almoço, jantar e lanche. No sistema proposto, porções dessas receitas eram transformadas em calorias, as quais são divididas da seguinte maneira: 20% no café da manhã, 30% no almoço, 30% no jantar e 25% no lanche.

Mais recentemente, Sapri et al. (2019) levaram em consideração variáveis como índice de massa corporal, nível de atividade física e necessidades nutricionais. Diferentemente de estudos anteriores, que empregavam otimização multiobjetivo e programação linear, esse trabalho enfatizou a abrangência de nutrientes necessários para a manutenção de uma dieta saudável para diabéticos. O desenvolvimento do modelo baseia-se na programação inteira para otimizar a ingestão de nutrientes, considerando fatores vitais para um plano dietético eficaz. Foram abordados elementos nutricionais como carboidratos, proteínas, gorduras, vitaminas, açúcares, gorduras saturadas, colesterol e minerais. A análise de sensibilidade e os resultados apresentados evidenciam a eficácia da abordagem proposta na otimização da ingestão de nutrientes para pacientes diabéticos. Os autores enfatizam

a necessidade de contemplar um amplo espectro de nutrientes no planejamento alimentar para portadores de diabetes.

Outros dois trabalhos que merecem destaque são o de Paidipati et al. (2021) e Ahourag et al. (2022), que lidaram com questões regionais de seus respectivos países. No caso do primeiro trabalho (Paidipati et al., 2021), os autores focaram na elaboração de cardápios voltados a pacientes portadores de diabetes na Índia, empregando técnicas de programação de metas para confeccionar o plano alimentar mais apropriado. A abordagem proposta levaram em consideração as preferências alimentares culturais e regionais dos pacientes indianos, aspecto essencial para garantir a aderência ao plano proposto. Ademais, os requerimentos nutricionais específicos dos diabéticos, como a busca por alimentos de baixo índice glicêmico e ricos em fibras, são devidamente ponderados.

A metodologia proposta pelos autores possibilitou a elaboração de um plano alimentar personalizado, atendendo às necessidades nutricionais dos pacientes, ao mesmo tempo em que respeita suas inclinações alimentares. O estudo enfatiza a importância de planos alimentares culturalmente adaptados para potencializar a adesão ao tratamento e otimizar o controle glicêmico. No entanto, Paidipati et al. (2021) reconhecem limitações inerentes à sua abordagem, como a necessidade de validações adicionais e os desafios na aplicação prática do método proposto.

Finalmente, Ahourag et al. (2022) propuseram uma abordagem para pacientes portadores de diabetes no Marrocos. Os autores recorreram a um modelo de programação linear multiobjetivo com duas funções objetivo. A primeira função busca minimizar o custo associado à dieta, enquanto a segunda visa reduzir a carga glicêmica total. Foram considerados dados sobre nutrientes fundamentais e o modelo foi resolvido por meio do algoritmo evolutivo NSGA-II (Deb et al., 2002). Resultados experimentais indicaram que o modelo proposto gerou dietas equilibradas, estabelecendo um compromisso entre carga glicêmica e custo, sempre respeitando as exigências dos pacientes. Os autores também sugeriram incorporar, em outros trabalhos, a variabilidade estocástica associada aos preços dos alimentos e à carga glicêmica.

3.2 Outros modelos de otimização de dietas

Além dos trabalhos apresentados na seção anterior, outros merecem destaque por características presentes em seus modelos ou na maneira como certas características do problema da dieta foram modelados.

Por exemplo, Maillot et al. (2010) abordaram a aceitabilidade de planos alimentares nutritivos e de baixo custo direcionados a consumidores de baixa renda. O objetivo central da pesquisa foi identificar se a rejeição desses alimentos por esse grupo de consumidores estava associada às normas sociais vigentes. Através da aplicação de modelos matemáticos lineares de otimização, os autores avaliaram a variedade e o custo da cesta

básica de alimentos que atendesse aos padrões dietéticos estabelecidos e às restrições de consumo. Os resultados demonstraram que é viável alcançar dietas nutritivas com custos extremamente reduzidos e que os planos alimentares saudáveis de menor custo são aceitáveis tanto cultural quanto socialmente.

Adicionalmente, essa pesquisa revelou que consumidores de baixa renda na França apresentam padrões de consumo alimentar distintos em comparação aos consumidores dos Estados Unidos. Assim, o trabalho destaca a relevância de considerar fatores culturais e sociais ao elaborar políticas e intervenções nutricionais.

Já Hui et al. (2021) introduziram um método para programação inteira de cardápios para pacientes com hipertensão arterial. O método proposto otimiza a programação do cardápio, levando em consideração as restrições dietéticas, como a necessidade de alimentos com baixo teor de sódio e gordura, e atendendo aos requisitos nutricionais dos pacientes. Para exemplificar a eficácia do método, os autores fornecem um estudo de caso envolvendo um grupo de pacientes hipertensos que receberam um cardápio elaborado através da técnica proposta. Os resultados indicaram que os pacientes conseguiram aderir ao cardápio e, conseqüentemente, apresentaram melhoria nos níveis de pressão arterial ao longo do tempo.

Finalmente, merece destaque um conjunto de trabalhos desenvolvidos por pesquisadores brasileiros objetivando dietas de baixa caloria (Silva et al., 2017a; Silva et al., 2017b; Xavier et al., 2023). Os autores consideram um modelo de otimização inteira não linear que visa a geração de dietas de até 1200 quilocalorias (Kcal). Como restrições, consideraram recomendações da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) sobre alguns nutrientes essenciais, como carboidratos, cálcio e ferro. Além disso, organizaram a dieta em seis refeições diárias, contemplando 17 itens alimentícios a serem consumidos em um dia. Esses itens foram organizados em categorias (bebidas, frutas, laticínios, entre outras), permitindo uma organização mais detalhada desses itens.

Assim como Paulino (2017), utilizaram a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TBCA) para obter informações nutricionais a respeito dos itens da dieta. Devido à natureza não linear do modelo proposto, os autores utilizaram duas meta-heurísticas: algoritmo genético e evolução diferencial. Os primeiros estudos visaram comparar o desempenho desses algoritmos, bem como a qualidade da solução gerada (Silva et al., 2017a; Silva et al., 2017b). Posteriormente, focaram no desenvolvimento de estratégias para melhorar o desempenho do algoritmo de evolução diferencial (Xavier et al., 2023).

3.3 Considerações finais

Diante do que foi exposto neste capítulo, observa-se a relevância de uma abordagem multiobjetivo para otimização de dietas para portadores de diabetes. Diversos trabalhos focam no desenvolvimento de modelos que consideram a redução do consumo de

carboidratos, enquanto outros visam reduzir a carga glicêmica. Finalmente, nota-se a preocupação em reduzir o custo financeiro associado à dieta gerada. Finalmente, há a preocupação de diversificar a dieta gerada.

Assim, este trabalho propõe diferentes modelos de programação inteira, considerando múltiplos objetivos, que têm como entrada itens comumente encontrados na alimentação brasileira. Como meta, busca-se primariamente minimizar a quantidade de carboidratos ingeridos, visto que esse nutriente é responsável pelo aumento da quantidade de açúcar no organismo (seu consumo, portanto, deve ser minimizado pelos portadores de diabetes). No próximo capítulo, são apresentados detalhes dos modelos propostos.

Modelos Propostos

Conforme descritos nos capítulos anteriores, o diabetes mellitus (DM) é uma condição crônica de saúde caracterizada por uma disfunção no metabolismo da glicose e que afeta milhões de pessoas em todo o mundo (Silva et al., 2020). O manejo eficaz desta condição envolve diversas estratégias, sendo que a implementação de uma dieta adequada ocupa um papel central. A alimentação adequada não só auxilia no controle glicêmico, como também contribui para a prevenção de complicações a longo prazo associadas à diabetes (Castro et al., 2021; Filippo et al., 2021).

A literatura científica destaca a necessidade de uma abordagem individualizada no manejo dietético da diabetes, visto que as necessidades nutricionais podem variar significativamente entre os indivíduos (Paulino, 2017; Filippo et al., 2021). No entanto, a elaboração de planos alimentares personalizados é um processo complexo e desafiador, que deve levar em consideração diversos fatores como idade, peso, atividade física, preferências alimentares, entre outros.

Diante deste cenário, surge a necessidade de desenvolver abordagens que possam otimizar e facilitar a criação de planos alimentares individualizados para pessoas com diabetes. Nesse contexto, este trabalho propõe a criação de uma modelagem matemática que visa abordar esta problemática de forma sistemática e precisa. A proposta é modelar as diversas variáveis envolvidas e, com base nisso, sugerir uma dieta que atenda às necessidades específicas de cada indivíduo, contribuindo para um melhor controle da doença.

Nesse sentido, este trabalho foi sendo desenvolvido de maneira incremental. Inicialmente, propôs-se um modelo de programação inteira mista (PIM) que visa, unicamente, a minimização do consumo de carboidratos. Esse modelo é descrito na Seção 4.1 deste capítulo. Em seguida, esse modelo foi estendido de modo a incorporar outros objetivos e permitindo a geração de diferentes dietas, conforme descrito na Seção 4.2. Finalmente, tendo como base outros trabalhos, refinou-se esse segundo modelo, chegando-se a uma versão mais robusta e flexível, detalhada na Seção 4.3.

4.1 Primeiro modelo: Minimização de carboidratos

O primeiro modelo proposto neste trabalho tem como objetivo principal elaborar um modelo de PL que determina um plano alimentar para um único dia, destinado a indivíduos com DM. O foco é minimizar a quantidade de carboidratos na dieta, considerando uma série de restrições nutricionais e dietéticas. A escolha de minimizar os carboidratos na dieta de indivíduos com diabetes é fundamentada em evidências científicas e práticas clínicas (Filippo et al., 2021; Graça; Jesus, 2023). Os carboidratos, quando ingeridos, são decompostos em glicose e outros açúcares simples durante a digestão, resultando em um aumento dos níveis de glicose no sangue. Para pessoas portadoras de diabetes, que têm dificuldade em regular esses níveis de glicose, uma ingestão excessiva de carboidratos pode resultar em picos glicêmicos indesejados (Filippo et al., 2021).

Seja J um conjunto composto por n alimentos. Define-se $Carb_j$ como a quantidade (em gramas) de carboidratos em uma porção do alimento $j \in J$. Define-se, também, a variável de decisão $A_j \in \mathbb{Z}^+$ que é a quantidade de porções do alimento j presentes na dieta gerada. A função objetivo, portanto, representa a minimização da quantidade de carboidratos a ser ingerida, ou seja:

$$\sum_{j \in J} A_j Carb_j.$$

Nesse modelo, as restrições representam as necessidades ou os limites nutricionais em uma dieta específica. Ao todo, foram considerados 16 nutrientes, listados a seguir: proteínas, lipídeos, colesterol, carboidratos, fibras alimentares, cálcio, magnésio, fósforo, ferro, sódio, potássio, zinco, vitamina A (retinol), vitamina B1 (tiamina), vitamina B2 (riboflavina) e vitamina C. Levou-se em consideração, também, a quantidade de calorias de cada alimento.

Muitos desses nutrientes (bem como as calorias) possuem uma quantidade *mínima* a ser consumida, uma vez que são essenciais para o organismo. Além disso, calorias, lipídeos, proteínas e sódio possuem um limite superior de consumo, pois, em excesso, podem causar outros problemas de saúde, como obesidade e enfermidades renais. Finalmente, a maioria dessas restrições possui um valor fixo; para este trabalho, foram adotadas as recomendações da Sociedade Brasileira de Diabetes (SBD, 2009), cujos valores são relacionados na Tabela 1.

Os nutrientes não listados na Tabela 1, ou seja, carboidratos e lipídeos (bem como o consumo de calorias), têm suas restrições flexíveis, dependendo de características específicas de cada indivíduo. De posse de todas essas informações, o modelo de programação linear inteira proposto, considerando as necessidades nutricionais de um indivíduo I , é apresentado a seguir.

$$\underset{A_j \in \mathbb{Z}^+}{\text{minimizar}} \quad \sum_{j=1}^n A_j Carb_j \quad (4a)$$

Tabela 1 – Recomendações nutricionais para portadores de diabetes mellitus.

Nutriente	Ingestão diária recomendada
Colesterol (<i>mg</i>)	Máximo de 290,0
Sódio (<i>mg</i>)	Máximo de 2000,0
Proteínas (<i>g</i>)	Entre 28,4 a 38,4
Fibra Alimentar (<i>g</i>)	Mínimo de 30,0
Cálcio (<i>mg</i>)	Mínimo de 850,0
Magnésio (<i>mg</i>)	Mínimo de 400,0
Fósforo (<i>mg</i>)	Mínimo de 700,0
Ferro (<i>mg</i>)	Mínimo de 18,0
Potássio (<i>mg</i>)	Mínimo de 3500,0
Zinco (<i>mg</i>)	Mínimo de 15,0
Vitamina A (μg)	Mínimo de 80,0
Vitamina B1 (<i>mg</i>)	Mínimo de 0,98
Vitamina B2 (<i>mg</i>)	Mínimo de 1,35
Vitamina C (<i>mg</i>)	Mínimo de 200,0

Fonte: Adaptado de SBD (2009).

sujeito a

$$\sum_{j=1}^n A_j Carb_j \geq minCarb_I, \quad (4b)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j Col_j \leq 290, \quad (4c)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j Na_j \leq 2000, \quad (4d)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j Prot_j \geq 28,4, \quad (4e)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j Prot_j \leq 38,4, \quad (4f)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j Cal_j \geq minCal_I, \quad (4g)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j Cal_j \leq maxCal_I, \quad (4h)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j Lip_j \leq maxLip_I, \quad (4i)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j Fib_j \geq 30, \quad (4j)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j Ca_j \geq 850, \quad (4k)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j M g_j \geq 400, \quad (4l)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j P_j \geq 700, \quad (4m)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j F e_j \geq 18, \quad (4n)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j P o t_j \geq 3500, \quad (4o)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j Z n_j \geq 15, \quad (4p)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j V a_j \geq 80, \quad (4q)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j V t_j \geq 0,98, \quad (4r)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j V r_j \geq 1,35, \quad (4s)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j V c_j \geq 200, \quad (4t)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j \leq N, \quad (4u)$$

$$A_j, N \in \mathbb{Z}^+ \quad (4v)$$

No modelo proposto, são consideradas as seguintes variáveis:

- $Carb_j$ representa a quantidade de carboidratos, em gramas (g), em uma porção do alimento j , sendo utilizada tanto como na função objetivo (4a) quanto na restrição (4b); o valor $minCarb_I$ é a quantidade mínima de carboidratos a ser ingerida por um indivíduo I .
- Col_j , vista na restrição (4c), representa a quantidade de colesterol em miligramas (mg) por porção do alimento j .
- Na_j , vista na restrição (4d), representa a quantidade de sódio (símbolo químico Na) em miligramas por porção alimento j .
- $Prot_j$, vista nas restrições (4e) e (4f), representa a quantidade de proteínas em miligramas por porção do alimento j ; essa variável possui limitantes superiores e inferiores.
- Cal_j , vista nas restrições (4g) e (4h) representa a quantidade de calorias em miligramas por porção do alimento j ; os valores $minCal_I$ e $maxCal_I$ são, respectivamente, a quantidade mínima e máxima de calorias a ser ingerida pelo indivíduo I .

- Lip_j , vista na restrição (4i), representa a quantidade de lipídios em gramas por porção do alimento j ; o valor $maxLip_I$ fornece a quantidade máxima de lipídeos a ser ingerida pelo indivíduo I .
- Fib_j , vista na restrição (4j), representa a quantidade de fibras alimentares em gramas por porção do alimento j .
- Ca_j , vista na restrição (4k), representa a quantidade de cálcio (símbolo químico Ca) em miligramas por porção do alimento j .
- Mg_j , vista na restrição (4l), representa a quantidade de magnésio (símbolo químico Mg) em gramas por porção do alimento j .
- P_j , vista na restrição (4m), representa a quantidade de fósforo (símbolo químico P) em miligramas por porção do alimento j .
- Fe_j , vista na restrição (4n), representa a quantidade de ferro (símbolo químico Fe) em miligramas por porção do alimento j .
- K_j , vista na restrição (4o), representa a quantidade de potássio (símbolo químico K) em miligramas por porção do alimento j .
- Zn_j , vista na restrição (4p), representa a quantidade de zinco (símbolo químico Zn) em miligramas por porção do alimento j .
- Va_j, Vt_j, Vr_j e Vc_j , vistos, respectivamente, nas restrições (4q), (4r), (4s) e (4t), representam a quantidade de vitaminas A (em microgramas, μg), B1 (em miligramas), B2 (em miligramas) e C (em miligramas) por porção do alimento j .

Neste primeiro estudo foi proposto um modelo matemático com o objetivo de otimizar a composição da dieta diária (Silva et al., 2020). No entanto, é importante reconhecer suas limitações inerentes. Primeiramente, uma limitação significativa reside na definição da variável de decisão A_j que, por ser inteira, pode não refletir a granularidade e a flexibilidade necessárias ao prescrever quantidades específicas de alimentos, especialmente quando quantidades menores ou maiores são requeridas para atender a necessidades nutricionais específicas.

Além disso, o modelo proposto é orientado para a geração de um cardápio para um único dia. Isto pode não ser representativo do comportamento alimentar ao longo de um período mais extenso, como uma semana ou um mês. A variação diária é um componente essencial para garantir a diversidade nutricional e evitar a monotonia na dieta.

Outra limitação é a ausência de restrições relativas à frequência com que um alimento específico pode aparecer em um menu diário. Essa omissão pode resultar em sugestões dietéticas que incluam repetidamente o mesmo alimento, o que pode não ser aconselhável

do ponto de vista nutricional e gastronômico. Adicionalmente, o modelo não faz distinções entre diferentes refeições ao longo do dia, ou seja, não especifica qual alimento deve ser consumido no café da manhã, almoço, jantar ou lanches intermediários. Tal generalização pode não levar em conta as práticas alimentares culturais e os padrões metabólicos diurnos.

Finalmente, o modelo se concentra exclusivamente na minimização dos carboidratos. Embora a ingestão de carboidratos seja uma consideração importante, a dieta equilibrada deve levar em conta uma série de outros macronutrientes e micronutrientes. Considerar um único objetivo limita a aplicabilidade do modelo a contextos em que a redução de carboidratos é o principal objetivo.

4.2 Segundo modelo: Otimização multiobjetivo

Após uma análise das limitações presentes no primeiro modelo, buscou-se explorar alternativas para aprimorar e refinar a proposta deste trabalho. De fato, o modelo poderia ser adaptado para refletir com mais precisão a complexidade presente no desenvolvimento de uma dieta diária.

Uma das modificações mais significativas foi a incorporação de novas funções objetivo. Assim, tendo como base diferentes trabalhos da literatura (Bas, 2014; Eghbali-Zarch et al., 2017), buscou-se incorporar novos objetivos associados ao perfil lipídico e ao colesterol, elementos importantes na avaliação de uma dieta equilibrada. Ademais, foi introduzida a minimizar o custo financeiro total da dieta, fator relevante no planejamento alimentar acessível.

O custo financeiro é representado pela variável $Custo_j$, que representa o valor, em reais, proporcional a uma porção do alimento $j \in J$. A representação matemática para este objetivo é dada pela função objetivo (5a), mostrada a seguir.

$$\underset{A_j \in \mathbb{Z}^+}{\text{minimizar}} \quad \sum_{j \in J} A_j \text{Custo}_j \quad (5a)$$

Já as outras duas funções objetivo focam, respectivamente, na minimização da quantidade de lipídios e do colesterol total da dieta proposta. Essas novas funções são mostradas a seguir:

$$\underset{A_j \in \mathbb{Z}^+}{\text{minimizar}} \quad \sum_{j \in J} A_j \text{Lip}_j \quad (6a)$$

$$\underset{A_j \in \mathbb{Z}^+}{\text{minimizar}} \quad \sum_{j \in J} A_j \text{Col}_j \quad (7a)$$

É importante destacar que, apesar de serem inseridos como funções objetivo, o consumo de lipídios e de colesterol foram mantidos, também, restrição do modelo (respectivamente, as restrições (4i) e (4c)). Isso ocorre pois seu consumo máximo tem que ser

respeitado; logo, seu valor mínimo não pode ser maior que os limites estabelecidos pelo modelo.

Alternativamente, também se considerou a minimização da soma dos dos lipídeos e colesterol (função objetivo (8a)). A motivação por trás dessa função objetivo é a busca por uma dieta que não apenas atenda aos requisitos nutricionais de cada macronutriente individualmente, mas que também promova um equilíbrio ótimo entre eles, potencializando benefícios à saúde e mitigando riscos.

$$\underset{A_j \in \mathbb{Z}^+}{\text{minimizar}} \quad \sum_{j \in J} A_j (Lip_j + Col_j) \quad (8a)$$

Além das mudanças implementadas na criação de novas funções objetivo, o modelo foi aprimorado com a introdução de um sistema de *penalidade* para cada alimento. Esse sistema visa incentivar a variabilidade da dieta gerada em diferentes dias, reduzindo a repetição excessiva de determinados alimentos. Inicialmente, todos os alimentos recebem uma penalidade nula. Esse estado inicial serve para colocar todos os itens em igualdade de condições perante as escolhas do modelo de otimização. Conforme o modelo é executado, objetivando o planejamento de diferentes dias, os alimentos selecionados para compor as refeições recebem o incremento de uma unidade em seus respectivos pesos, indicando sua inclusão na dieta diária.

Para assegurar diversidade alimentar e evitar a seleção frequente dos mesmos itens, introduziu-se uma restrição de penalidade cumulativo. A soma das penalidades de todos os alimentos incluídos em um plano alimentar não deve exceder um valor estipulado, que após alguns testes no modelo foi escolhido cinco. A restrição de penalidade, proposto neste trabalho, pode ser matematicamente formalizada da seguinte maneira:

$$\sum_{j=1}^n A_j \omega_j \leq 5 \quad (9)$$

sendo que ω_j representa a penalidade do alimento j .

Analogamente, a penalidade de um alimento é decrementada em uma unidade caso esse alimento não faça parte da dieta em um dia subsequente (desde que, obviamente, sua penalidade seja maior que zero). Esse mecanismo garante que alimentos não selecionados em um dia possam ter maiores chances de inclusão nos dias subsequentes, estimulando assim uma variação contínua no espectro alimentar consumido.

Dessa forma, o sistema de penalidade atua como um regulador na formulação de dietas, equilibrando a frequência de consumo dos alimentos e garantindo que as recomendações nutricionais sejam cumpridas não apenas em um dia isolado, mas ao longo de um período mais extenso. Esse mecanismo se mostra particularmente eficaz para a elaboração de planos alimentares que contemplam os princípios de uma alimentação saudável e variada, tão necessários em estratégias nutricionais de médio e longo prazo.

Embora essa segunda versão do modelo de planejamento de dieta apresente avanços significativos, ainda possui algumas limitações. Basicamente, a modelagem proposta não delimita especificamente os alimentos que devem ser consumidos em cada refeição, apenas ao longo do dia. Esta ausência de especificidade pode resultar em recomendações que, embora nutricionalmente válidas, podem não se alinhar com as práticas alimentares convencionais ou preferências individuais.

4.3 Terceiro modelo: Otimização multiobjetivo com organização em refeições

Experimentos com a segunda versão do modelo (relatados no Capítulo 5, levaram a uma simplificação da função objetivo. Nesta nova versão, o foco foi limitado à minimização de dois macronutrientes essenciais: os carboidratos e os lipídeos. Essa abordagem permite uma análise mais concisa e direcionada dos componentes dietéticos que frequentemente são alvo de controle para atingir metas de saúde e bem-estar.

Nessa nova etapa, utilizou-se informações presentes nos trabalhos de Silva et al. (2017b) e Xavier et al. (2023), que separaram os alimentos em diferentes categorias as quais, por sua vez, são utilizadas como base para organizar as diferentes refeições do dia. No entanto, os autores, conforme discutido no Capítulo 3, utilizam meta-heurísticas para otimizar seu modelo de dietas; neste trabalho, adaptou-se essa modelagem para poder ser utilizada por métodos de programação linear.

A categorização dos alimentos reflete uma abordagem mais granular no planejamento dietético e permite uma análise mais detalhada do consumo alimentar, garantindo que cada refeição contenha uma distribuição equilibrada de macronutrientes e micronutrientes essenciais. Essas categorias são descritas a seguir:

- ❑ Bebidas (B): englobando itens que são principalmente líquidos, principalmente água, chás e cafés. Aqui, não são incluídas bebidas lácteas ou sucos, todos classificados em outro grupo.
- ❑ Carboidratos: subdivididos em C1, como pães e cereais refinados – comuns em lanches –, e C2, incluindo grãos integrais e tubérculos – mais comuns em refeições principais (almoço e janta).
- ❑ Frutas (F): abrangendo uma variedade de frutas frescas ou preparadas sem adição de açúcares ou conservantes.
- ❑ Grãos (G): contendo uma variedade de grãos que são ricos em fibras e outros nutrientes essenciais.

- ❑ Lácteos (L): incluindo leite e seus derivados, proporcionando uma fonte de cálcio e proteínas.
- ❑ Proteínas (P): compreendendo carnes magras, peixes, ovos e leguminosas, essenciais para a manutenção e reparo dos tecidos corporais.
- ❑ Sucos (S): referindo-se a bebidas derivadas de frutas, frescas ou processadas, sem adição de açúcares.
- ❑ Vegetais (V): oferecendo um espectro de vegetais folhosos, crucíferos e outros tipos, fundamentais para fornecer vitaminas, minerais e fibras.

Essas categorias são importantes para a distribuição equitativa de nutrientes nas refeições, promovendo um padrão alimentar que atende às recomendações dietéticas e adapta-se às necessidades metabólicas ao longo do dia. É importante destacar que os autores (Silva et al., 2017b; Xavier et al., 2023) trabalharam no desenvolvimento de dietas de baixo teor calórico, não tendo relação com diabetes. Porém, essa subdivisão mostrou-se adequada aos propósitos deste trabalho.

Além dessas categorias, o trabalho de Silva et al. (2017b) trouxe uma organização da dieta em seis refeições diárias, cada uma com um conjunto de alimentos. Neste trabalho, optou-se por seguir a mesma divisão. Isso auxiliou na criação de um algoritmo de seleção de alimentos mais eficaz e orientado para um planejamento alimentar personalizado e diversificado. A Tabela 2 ilustra a aplicação prática das categorias alimentares nas refeições diárias.

Tabela 2 – Itens presentes em cada refeição

Refeição	Quantidade de alimentos
Café da manhã	B, F e C1
Primeiro lanche	F ou L
Almoço	C2, G, V, P e S
Segundo lanche	B ou S, C1
Jantar	C2, G, V e P
Ceia	F ou L

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2017b).

Na Tabela 2, observa-se que, por exemplo, o café da manhã é composto por três porções de alimentos: uma bebida, uma fruta e um carboidrato do tipo 1. Já o primeiro lanche deve conter apenas um item: ou uma fruta, ou um derivado do leite. Essa organização diária de alimentos, em conjunto com o sistema de penalidades descrito na Seção 4.2, possibilitou o desenvolvimento de um modelo de otimização matemática mais robusto, que permite a geração de uma dieta para diferentes dias, separada em refeições específicas e, ainda, buscando minimizar a ingestão de carboidratos e de lipídeos.

Experimentos e Análise dos Resultados

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados dos três modelos de otimização propostos neste trabalho, evidenciando o refinamento da modelagem em resposta às limitações identificadas nas versões anteriores. Os dois primeiros modelos serviram de base para realçar as melhorias implementadas no terceiro e último modelo, que incorporou um sistema de penalidades dinâmico e critérios de seleção de alimentos mais refinados. Este capítulo está dividido em seções correspondentes a cada um dos modelos, detalhando os dados gerados, as dietas propostas e a conformidade com os objetivos nutricionais estipulados.

O último modelo também é comparado com o trabalho de Silva et al. (2017a) e Silva et al. (2017b), levando-se em consideração aspectos como diversidade alimentar, equilíbrio nutricional e satisfação das necessidades dietéticas diárias. Por meio dessa comparação, é possível identificar o potencial do modelo proposto em ser adaptado ao contexto apresentado nesta dissertação.

Todos os modelos foram implementados na linguagem Python 3 utilizando a biblioteca PuLP. Essa biblioteca, de código-fonte aberto, provê uma interface de programação com diferentes solucionadores de programação linear. Por padrão, utiliza o COIN-OR Linear Programming (CBC), que permite resolver problemas de otimização de larga escala. Todos os códigos-fonte desenvolvidos, bem como as bases de dados utilizadas, estão disponíveis no link: https://github.com/Thiagofs1211/Dieta_Python

5.1 Base de dados e perfis nutricionais

Para a validação dos modelos, é necessário considerar um conjunto de alimentos bem como seus nutrientes. A composição nutricional destes alimentos, neste trabalho, foi extraída da Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TBCA), versão 6.0, desenvolvida pela Universidade de São Paulo (USP, 2020). Essa base de dados possui um catálogo abrangente, apresentando 597 variedades alimentares em diferentes estados de preparo: *in natura*, cozidos ou em conserva. Os dados da TBCA são relativos à porções

de 100 gramas de consumo de cada item, permitindo análises sobre o conteúdo calórico, proteico, lipídico, além de colesterol, carboidratos, fibras alimentares, macro e microelementos (cálcio, magnésio, manganês, fósforo, ferro, sódio, potássio, cobre e zinco), bem como retinol (vitamina A), tiamina (vitamina B1), riboflavina (vitamina B2), e ácido ascórbico (vitamina C).

A utilização de informações nutricionais expressas em porções de 100g para cada alimento proporciona um padrão de referência que permite a uniformização das comparações e avaliações, constituindo-se em um parâmetro essencial para a calibração dos modelos dietéticos propostos. Deve-se ressaltar que a precisão e a confiabilidade dos dados da TBCA endossam a robustez dos modelos matemáticos desenvolvidos, assegurando que as recomendações dietéticas geradas estejam em conformidade com padrões nutricionais reconhecidos e validados cientificamente.

Além disso, para gerar diferentes instâncias do problema da dieta, foram selecionados perfis de três indivíduos fictícios, conforme descritos por Paulino (2017). Cada indivíduo apresenta características distintas em termos de gênero, estatura e nível de atividade física, sendo todos diagnosticados com diabetes mellitus tipo 2. A partir desses perfis, é possível avaliar a eficácia dos modelos propostos sob condições variadas, refletindo as necessidades nutricionais específicas de cada indivíduo. A Tabela 3 apresenta as demandas calóricas e os limites de consumo de macronutrientes essenciais (carboidratos e lipídios) desses indivíduos.

Tabela 3 – Perfil alimentar de três indivíduos hipotéticos

Indivíduo	Sexo	Altura (m)	Nível de atividade física	Calorias (kcal)	Carboidratos (g)	Lipídeos (g)
I1	Feminino	1,50	Moderada	1800	202,5	60
I2	Masculino	1,70	Leve	2100	236,5	70
I3	Feminino	1,75	Intensa	3000	337,5	100

Fonte: Adaptado de Paulino (2017).

A fim de determinar o limite superior de ingestão calórica, aplicou-se, nos dados da Tabela 3 um incremento de 10% sobre o valor mínimo ($minCal$), estabelecendo assim o valor de $maxCal$. Matematicamente, esta relação é expressa como $maxCal = minCal + (minCal \cdot 0.1)$, garantindo que a dieta proposta ofereça flexibilidade, ao mesmo tempo em que evita o excesso calórico. Esse parâmetro de 10% acima do valor mínimo busca atender às flutuações naturais no gasto energético diário, permitindo um ajuste alimentar que possa absorver variações na atividade física sem comprometer o controle glicêmico necessário para indivíduos com diabetes mellitus tipo 2.

5.2 Primeiro Modelo

A partir dos dados apresentados na seção anterior, é possível validar as três versões do modelo proposto. Para a primeira versão (apresentada na Seção 4.1), foi considerado um subconjunto da TBCA composto por 172 itens alimentares. Todos esses itens estão disponíveis no Guia Alimentar para a População Brasileira (Brasil, 2008), disponibilizado pelo Ministério da Saúde. Optou-se por esse subconjunto por ser composto por alimentos bastante comuns em praticamente todas as regiões do Brasil. É importante destacar que a TBCA é muito abrangente, trazendo itens bastante específicos, alguns dos quais bastante incomuns em diversos estados.

A Tabela 4 traz os alimentos sugeridos, para um dia, a partir da execução do primeiro modelo para cada um dos três indivíduos considerados. Já na Tabela 5, são apresentados os valores numéricos da função objetivo e das restrições desse modelo.

Tabela 4 – Alimentos resultantes para cada indivíduo no primeiro modelo

Indivíduo 1		Indivíduo 2		Indivíduo 3	
Alimento	Quant.	Alimento	Quant.	Alimento	Quant.
Agrião cru	396g	Agrião cru	393g	Agrião cru	396g
Arroz tipo 1 cozido	125g	Arroz integral cozido	198g	Creme de arroz em pó	120g
Azeite de oliva extra virgem	40ml	Azeite de dendê	9ml	Feijão jalo cozido	60g
Creme de arroz em pó	20g	Azeite de oliva extra virgem	24ml	Feijão preto cozido	80g
Feijão jalo cozido	120g	Cenoura cozida	35g	Feijão roxo cozido	50g
Leite de vaca integral	2184ml	Feijão jalo cozido	120g	Leite de vaca integral	1820ml
Amido de milho cru	232g	Leite de vaca integral	2002ml	Manteiga com sal	10g
Quiabo cru	52g	Margarina com sal	10g	Margarina com sal	10g
		Margarina sem sal	10g	Margarina sem sal	90g
		Amido de milho cru	296g	Amido de milho cru	416g
		Sardinha em conserva em óleo	83g	Sardinha em conserva em óleo	41g

Fonte: Autoria própria.

Este modelo foi capaz de elaborar dietas personalizadas para três indivíduos distintos, respeitando as restrições alimentares predefinidas e priorizando a minimização do consumo de carboidratos como mostrado nas Tabelas 4 e 5. A modelagem nutricional se alinhou às necessidades energéticas individuais, demonstrando a capacidade do modelo de adaptar-se a parâmetros nutricionais específicos (Silva et al., 2020).

No entanto, ao analisar a aplicabilidade das dietas geradas, observa-se limitações significativas. As quantidades atribuídas a certos alimentos, como o amido de milho, por exemplo, apresentam-se em volumes consideravelmente altos, o que compromete a viabilidade e aceitação da dieta no contexto do dia a dia dos indivíduos. Essa característica sugere uma possível desconexão entre a teoria nutricional modelada e a prática alimentar habitual, evidenciando uma necessidade de melhoria para o modelo proposto.

A ausência de uma estruturação em refeições definidas constitui outra limitação relevante. A falta de um planejamento que segmente o consumo dos alimentos em café da manhã, almoço, jantar e outras refeições diárias resulta em uma implementação ineficaz

Tabela 5 – Comparação dos valores nutricionais para três indivíduos

Nutriente	Indivíduo 1	Indivíduo 2	Indivíduo 3
Calorias (<i>kcal</i>)	1800,88	2100,09	3000,48
Carboidratos (<i>g</i>)	276,36	327,58	482,01
Lipídeos (<i>g</i>)	59,95	69,97	99,88
Colesterol (<i>mg</i>)	278,98	260,78	231,99
Sódio (<i>mg</i>)	1999,08	1985,54	1717,61
Proteínas (<i>g</i>)	38,04	38,32	38,21
Fibras (<i>g</i>)	31,15	33,22	33,21
Cálcio (<i>mg</i>)	3771,14	3503,13	3062,10
Magnésio (<i>mg</i>)	416,85	483,69	417,35
Fósforo (<i>mg</i>)	2660,62	2657,49	2338,20
Ferro (<i>mg</i>)	18,13	18,39	18,00
Potássio (<i>mg</i>)	4681,30	4485,84	4162,69
Zinco (<i>mg</i>)	15,57	15,04	15,05
Vitamina A (μ <i>g</i>)	458,64	518,02	989,01
Vitamina C (<i>mg</i>)	240,90	237,99	237,99
Vitamina B1 (<i>mg</i>)	1,90	1,92	1,80
Vitamina B2 (<i>mg</i>)	6,18	5,74	5,29

Fonte: Autoria própria.

da dieta, com potencial desbalanceamento na distribuição de nutrientes e energia ao longo do dia. Essa deficiência pode, também, afetar negativamente a adesão ao plano alimentar, uma vez que a organização das refeições é um aspecto central para a manutenção de hábitos alimentares saudáveis.

Finalmente, a variedade alimentar observada nas dietas modeladas pode não apenas afetar a palatabilidade e a satisfação com a dieta, mas também limitar a ingestão diversificada de micronutrientes essenciais para a saúde. A monotonia alimentar é reconhecida como um fator que contribui para a baixa aderência a regimes alimentares a longo prazo, sendo, portanto, uma consideração crítica em qualquer plano de dieta que se pretenda sustentável.

5.3 Segundo Modelo

Nesta seção, são apresentados os resultados alcançados com a aplicação da segunda modelagem proposta. Esse modelo incorpora alterações significativas com o intuito de superar as limitações identificadas no modelo inicial e atender de maneira mais eficaz às necessidades nutricionais dos indivíduos.

Conforme mostrado na Seção 4.2, as alterações foram a introdução de múltiplos objetivos. Agora, considera-se, também, a redução dos lipídios totais e do colesterol, bem como fatores econômicos no planejamento dietético. Essas inclusões visam uma dieta que não

apenas atenda aos parâmetros nutricionais de forma isolada, mas que também promova um equilíbrio ótimo entre os componentes dietéticos, considerando a interdependência desses na saúde metabólica do indivíduo.

Para a avaliação do segundo modelo, utilizou-se os mesmos indivíduos apresentados na Tabela 3, permitindo uma comparação direta e a análise do impacto das novas variáveis introduzidas. Quatro experimentos distintos foram conduzidos para testar a eficácia do modelo melhorado, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Funções Objetivo

Experimento	Primeira FO	Segunda FO	Terceira FO	Quarta FO
1	Min Carboidrato	Min Lipídeos	Min Colesterol	-
2	Min Carboidrato	Min Colesterol + Lipídeos	-	-
3	Min Carboidrato	Min Lipídeos	Min Colesterol	Min Custo
4	Min Carboidrato	Min Custo	Min Colesterol + Lipídeos	-

Fonte: Autoria própria.

Essa estrutura experimental foi desenvolvida para explorar a capacidade do modelo de adaptar-se a variados objetivos dietéticos e restrições orçamentárias. Os resultados destes experimentos proporcionam conhecimentos sobre a intersecção entre nutrição e economia na formulação de dietas, equilibrando as necessidades nutricionais com a realidade econômica dos indivíduos (Soares et al., 2023).

5.3.1 Experimento 1: Minimização de carboidratos, lipídios e colesterol

O Experimento 1 segue a abordagem lexicográfica para a minimização de macronutrientes específicos. Nesse experimento, a priorização se dá inicialmente na minimização dos carboidratos, seguida pela atenção aos lipídios e, por fim, ao colesterol. Conforme discutido na Seção 2.3, o método lexicográfico permite uma hierarquização dos objetivos nutricionais, atendendo a uma sequência que reflete a importância relativa de cada componente na dieta.

Os resultados do Experimento 1, conforme ilustrado nas Tabelas 7 a 10, evidenciam a eficácia do método lexicográfico na estruturação de dietas que priorizam a minimização dos macronutrientes. A implementação deste método possibilitou uma análise do impacto de tais restrições alimentares sobre a composição nutricional global das dietas propostas para cada indivíduo.

É importante ressaltar a capacidade do método lexicográfico de se adaptar a diferentes perfis e necessidades individuais, como mostrado pela personalização das dietas dos três indivíduos na Tabela 7 e os nutrientes na Tabela 8. Cada dieta reflete uma combinação de restrições e preferências, ajustando-se para fornecer um plano alimentar que promova não apenas a saúde e o bem-estar, mas também a satisfação do paladar.

Além disso, a formulação das dietas diárias para o Indivíduo 1 apresentada nas Tabelas 9 e 10 foi calibrada através do sistema de penalidades, que proporcionou a base para a diversificação da ingestão alimentar em três dias consecutivos. As penalidades foram ajustadas para cada dia com o objetivo de atender às demandas nutricionais variáveis e às metas de saúde específicas. No primeiro dia, por exemplo, obteve-se o melhor valor de carboidrato. Devido à exclusão de alguns alimentos no segundo dia (devido à penalidade), a quantidade de carboidratos aumentou nos outros dias, porém foi possível melhorar os outros objetivos, como o colesterol, que chegou a ser anulado. Essa abordagem de pesos variáveis permitiu que cada dia da dieta não só atendesse aos requisitos calóricos e nutricionais, como também introduzisse uma variabilidade na rotina alimentar, evitando a monotonia dietética.

Tabela 7 – Distribuição dos alimentos obtida pelo Experimento 1 para os três indivíduos

Indivíduo 1		Indivíduo 2		Indivíduo 3	
Alimento	Quant.	Alimento	Quant.	Alimento	Quant.
Agrião cru	264g	Agrião cru	264g	Agrião cru	396g
Aipo cru	80g	Aipo cru	320g	Aipo cru	160g
Alface americana crua	600g	Azeite de oliva extra virgem	8ml	Alface americana crua	120g
Azeite de oliva extra virgem	16ml	Batata doce cozida	150g	Arroz integral cozido	198g
Cereal matinal de milho com açúcar	43g	Cereal matinal de milho com açúcar	43g	Azeite de dendê	36ml
Creme de arroz em pó	200g	Creme de arroz em pó	240g	Azeite de oliva extra virgem	24ml
Feijão rajado cozido	100g	Feijão carioca cozido	48g	Batata inglesa cozida	180g
Feijão rosinha cozido	120g	Feijão fradinho cozido	60g	Cereal matinal de milho com açúcar	43g
Leite de vaca integral	728ml	Feijão preto cozido	80g	Creme de arroz em pó	160g
Margarina com sal	20g	Leite de vaca integral	728ml	Feijão jalo cozido	60g
Margarina sem sal	30g	Margarina com sal	10g	Leite de vaca integral	910ml
Melado	32g	Margarina sem sal	50g	Margarina sem sal	40g
Amido de milho cru	8g	Melado	32g	Amido de milho cru	264g
		Óleo de milho	8ml		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Comparação dos valores nutricionais do Experimento 1 para os três indivíduos.

Nutriente	Indivíduo 1	Indivíduo 2	Indivíduo 3
Calorias (<i>kcal</i>)	1801,04	2100,19	3000,00
Carboidratos (<i>g</i>)	286,29	337,31	491,59
Lipídeos (<i>g</i>)	57,33	67,41	97,19
Colesterol (<i>mg</i>)	72,80	72,80	91,00
Sódio (<i>mg</i>)	913,99	827,72	867,11
Proteínas (<i>g</i>)	38,33	38,37	38,38
Fibras (<i>g</i>)	30,56	30,88	31,56
Cálcio (<i>mg</i>)	1507,21	1601,99	1840,24
Magnésio (<i>mg</i>)	400,07	403,80	429,06
Fósforo (<i>mg</i>)	1440,70	1418,87	1638,94
Ferro (<i>mg</i>)	18,04	18,11	18,77
Potássio (<i>mg</i>)	3567,30	3549,35	3552,02
Zinco (<i>mg</i>)	16,05	15,09	16,10
Vitamina A (μ <i>g</i>)	400,42	459,81	400,42
Vitamina C (<i>mg</i>)	235,66	219,52	273,75
Vitamina B1 (<i>mg</i>)	1,60	1,68	1,82
Vitamina B2 (<i>mg</i>)	2,84	2,84	3,57
Custo (<i>R\$</i>)	43,54	45,60	48,99

Fonte: Autoria própria.

Tabela 9 – Distribuição dos alimentos obtidos pelo Experimento 1 para o I1 em três dias.

Dia 1		Dia 2		Dia 3	
Alimento	Quant.	Alimento	Quant.	Alimento	Quant.
Agrião cru	264g	Abóbora moranga refogada	140g	Aipo cru	80g
Aipo cru	80g	Agrião cru	396g	Azeite de dendê	36ml
Alface americana crua	600g	Alface crespa crua	120g	Beterraba cozida	43g
Azeite de oliva extra virgem	16ml	Arroz integral cozido	198g	Cenoura cozida	35g
Cereal matinal de milho com açúcar	43g	Azeite de dendê	27ml	Cereal matinal de milho	43g
Creme de arroz em pó	200g	Batata doce cozida	150g	Cereal matinal de milho com açúcar	43g
Feijão rajado cozido	100g	Beterraba cozida	172g	Farinha de puba	80g
Feijão rosinha cozido	120g	Cenoura cozida	315g	Feijão carioca cozido	48g
Leite de vaca integral	728ml	Cereal matinal de milho	43g	Feijão preto cozido	320g
Margarina com sal	20g	Cereal matinal de milho com açúcar	43g	Jiló cru	37g
Margarina sem sal	30g	Feijão roxo cozido	50g	Margarina sem sal	20g
Melado	32g	Suco de maracujá concentrado	188ml	Maxixe cru	120g
Amido de milho cru	8g	Margarina com sal	20g	Melado	32g
		Amido de milho cru	16g	Amido de milho cru	8g
		Óleo de milho	8ml	Quiabo cru	156g
				Rúcula crua	360g

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 – Resultado para a dieta obtida pelo primeiro modelo para o I1 para três dias.

Nutriente	Dia 1	Dia 2	Dia 3
Calorias (<i>kcal</i>)	1801,04	1800,18	1801,56
Carboidratos (<i>g</i>)	286,29	294,77	297,06
Lipídeos (<i>g</i>)	57,33	57,23	57,30
Colesterol (<i>mg</i>)	72,80	0	0
Sódio (<i>mg</i>)	913,99	782,84	725,53
Proteínas (<i>g</i>)	38,33	38,32	38,29
Fibras (<i>g</i>)	30,56	47,30	58,20
Cálcio (<i>mg</i>)	1507,21	857,79	977,68
Magnésio (<i>mg</i>)	400,07	451,10	400,67
Fósforo (<i>mg</i>)	1440,70	973,46	718,60
Ferro (<i>mg</i>)	18,04	19,35	18,12
Potássio (<i>mg</i>)	3567,30	3510,09	3506,75
Zinco (<i>mg</i>)	16,05	15,13	15,75
Vitamina A (μ <i>g</i>)	400,42	90,55	104,66
Vitamina C (<i>mg</i>)	235,66	343,33	214,71
Vitamina B1 (<i>mg</i>)	1,60	2,16	1,69
Vitamina B2 (<i>mg</i>)	2,84	2,12	1,44
Custo (<i>R\$</i>)	43,54	36,38	32,27

Fonte: Autoria própria.

5.3.2 Experimento 2: Minimização de carboidratos e da combinação de lipídios e colesterol

O Experimento 2 distingue-se do primeiro pela segunda função objetivo, onde a redução do colesterol não é mais uma etapa isolada, mas sim uma meta simultânea à redução de lipídeos. Essa modificação visa explorar a limitação de dois macronutrientes que são comumente elevados em padrões alimentares contemporâneos e associados a riscos de saúde. O intuito é avaliar como tal combinação pode influenciar de maneira mais efetiva a qualidade nutricional da dieta, sem comprometer a viabilidade e a aceitabilidade do plano alimentar proposto.

Os resultados observados no Experimento 2, apresentados nas Tabelas 12 e 14 revelam uma característica distintiva em comparação ao Experimento E1: a concentração de colesterol foi reduzida a zero desde o primeiro dia. Essa mudança é atribuída diretamente à revisão da função objetivo, onde a minimização do colesterol foi priorizada junto com a dos lipídeos, refletindo uma abordagem mais restritiva na gestão de macronutrientes associados a preocupações de saúde cardiovascular.

É interessante notar que, apesar da eliminação do colesterol da dieta, houve um ligeiro aumento nos lipídeos. Esse resultado pode sugerir uma compensação nutricional ou uma resposta ao realinhamento das prioridades dietéticas impostas pela nova fun-

ção objetivo. A elevação nos lipídeos, embora modesta, destaca a complexidade inerente ao equilíbrio entre diferentes objetivos nutricionais e sublinha a importância de um planejamento dietético cuidadoso. Além disso, examinando o consumo de fibras, cálcio e magnésio, observa-se uma potencial contribuição positiva da dieta para a saúde gastrointestinal e óssea, áreas de interesse para a população diabética, que muitas vezes enfrenta complicações relacionadas a esses aspectos.

A abordagem metódica do Experimento 2, embora mais custosa diariamente, destaca a importância de avaliar a relação custo-eficácia de intervenções dietéticas no contexto do diabetes. A aceitação dessa despesa adicional pelos indivíduos em troca de benefícios na gestão do diabetes pode lançar luz sobre a viabilidade e a aceitação de estratégias nutricionais personalizadas.

Ao analisar os resultados com base nas Tabelas 11 e 13, observa-se um ponto de atenção significativo: as altas quantidades de alguns alimentos únicos presentes na dieta diária. Essa particularidade da composição alimentar pode levantar preocupações quanto à diversidade nutricional e ao risco de monotonia alimentar, o que pode ser especialmente problemático para indivíduos com diabetes, que necessitam de uma dieta variada para gerenciar eficazmente a condição.

A predominância de um único alimento pode levar a desequilíbrios nutricionais, limitando a ingestão de um espectro amplo de micronutrientes essenciais para a manutenção da saúde metabólica. No gerenciamento do diabetes, a diversidade alimentar é chave para garantir uma distribuição equilibrada de carboidratos ao longo do dia, o que ajuda a manter os níveis de glicose sanguínea estáveis. Além disso, o alto consumo de um alimento pode induzir a saturação do paladar, reduzindo a satisfação com a dieta e prejudicando a adesão a longo prazo. A adesão é um componente crítico no sucesso do manejo do diabetes; portanto, qualquer fator que possa diminuir a vontade do paciente de seguir a dieta prescrita merece consideração cuidadosa.

Tabela 11 – Distribuição dos alimentos gerados no Experimento 2 para os três indivíduos

Indivíduo 1		Indivíduo 2		Indivíduo 3	
Alimento	Quant.	Alimento	Quant.	Alimento	Quant.
Agrião cru	264g	Agrião cru	264g	Agrião cru	264g
Aipo cru	480g	Aipo cru	880g	Aipo cru	480g
Alface americana crua	600g	Arroz integral cozido	396g	Alface americana crua	720g
Arroz integral cozido	396g	Arroz tipo 1 cozido	250g	Arroz integral cozido	396g
Arroz tipo 1 cozido	125g	Azeite de oliva extra virgem	8ml	Azeite de oliva extra virgem	30ml
Azeite de dendê	9ml	Beterraba crua	42g	Batata inglesa cozida	90g
Azeite de oliva extra virgem	16ml	Cereal matinal de milho com açúcar	86g	Cereal matinal de milho com açúcar	86g
Cereal matinal de milho com açúcar	86g	Creme de arroz em pó	40g	Creme de arroz em pó	40g
Creme de arroz em pó	20g	Margarina com sal	10g	Margarina com sal	80g
Feijão jalo cozido	60g	Margarina sem sal	30g	Amido de milho cru	248g
Margarina com sal	30g	Amido de milho cru	8g	Torrada de pão francês	33g
Amido de milho cru	8g	Óleo de milho	24ml	Óleo de milho	8ml
Rabanete cru	90g				
Óleo de milho	8ml				

Fonte: Autoria própria.

Tabela 12 – Comparação dos valores nutricionais obtidos no Experimento 2 para os três indivíduos

Nutriente	Indivíduo 1	Indivíduo 2	Indivíduo 3
Calorias (<i>kcal</i>)	1800,05	2100,10	3000,10
Carboidratos (<i>g</i>)	286,31	337,54	491,85
Lipídeos (<i>g</i>)	59,26	69,27	99,10
Colesterol (<i>mg</i>)	0	0	0
Sódio (<i>mg</i>)	736,13	576,99	1464,67
Proteínas (<i>g</i>)	38,39	38,39	38,38
Fibras (<i>g</i>)	41,43	32,76	34,42
Cálcio (<i>mg</i>)	859,62	1012,98	851,61
Magnésio (<i>mg</i>)	415,86	403,34	417,76
Fósforo (<i>mg</i>)	991,02	954,81	1019,15
Ferro (<i>mg</i>)	19,66	19,54	19,37
Potássio (<i>mg</i>)	3601,04	3572,77	3502,60
Zinco (<i>mg</i>)	15,40	15,03	15,32
Vitamina A (μg)	135,82	202,27	362,20
Vitamina C (<i>mg</i>)	274,18	224,44	282,16
Vitamina B1 (<i>mg</i>)	1,59	1,33	1,70
Vitamina B2 (<i>mg</i>)	1,57	1,56	1,56
Custo (<i>R\$</i>)	64,76	77,92	72,61

Fonte: Autoria própria.

Tabela 13 – Distribuição dos alimentos gerados no Experimento 2 para o I1 em três dias

Dia 1		Dia 2		Dia 3	
Alimento	Quant.	Alimento	Quant.	Alimento	Quant.
Agrião cru	264g	Agrião cru	132g	Agrião cru	132g
Aipo cru	480g	Aipo cru	160g	Alface crespa crua	600g
Alface americana crua	600g	Almeirão cru	180g	Azeite de dendê	36ml
Arroz integral cozido	396g	Batata doce cozida	150g	Batata inglesa cozida	90g
Arroz tipo 1 cozido	125g	Cenoura cozida	105g	Beterraba crua	43g
Azeite de dendê	9ml	Cenoura crua	38g	Cereal matinal de milho	43g
Azeite de oliva extra virgem	18ml	Cereal matinal de milho com açúcar	86g	Creme de arroz em pó	20g
Cereal matinal de milho com açúcar	86g	Creme de arroz em pó	100g	Espinafre Nova Zelândia refogado	67g
Creme de arroz em pó	20g	Feijão preto cozido	80g	Feijão carioca cozido	48g
Feijão jalo cozido	60g	Feijão rosinha cozido	180g	Feijão rajado cozido	100g
Margarina com sal	30g	Margarina com sal	10g	Margarina com sal	10g
Amido de milho cru	8g	Margarina sem sal	60g	Margarina sem sal	10g
Rabanete cru	90g	Melado	32g	Melado	96g
Óleo de milho	8ml	Amido de milho cru	8g	Amido de milho cru	16g
		Quiabo cru	104g	Folha de mostarda crua	60g
		Rúcula crua	180g	Torrada de pão francês	33g

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 – Resultado para a dieta obtida no Experimento 2 para o I1 para três dias

Nutriente	Dia 1	Dia 2	Dia 3
Calorias (<i>kcal</i>)	1800,05	1800,02	1800,08
Carboidratos (<i>g</i>)	286,31	287,88	291,46
Lipídeos (<i>g</i>)	59,26	59,45	59,91
Colesterol (<i>mg</i>)	0	0	0
Sódio (<i>mg</i>)	736,13	549,98	1287,52
Proteínas (<i>g</i>)	38,39	38,32	38,35
Fibras (<i>g</i>)	41,43	42,46	39,10
Cálcio (<i>mg</i>)	859,62	850,00	863,61
Magnésio (<i>mg</i>)	415,86	400,73	404,51
Fósforo (<i>mg</i>)	991,02	798,93	737,84
Ferro (<i>mg</i>)	19,66	18,10	19,61
Potássio (<i>mg</i>)	3601,04	3523,85	3523,05
Zinco (<i>mg</i>)	15,40	15,25	15,71
Vitamina A (μ <i>g</i>)	135,82	359,26	97,60
Vitamina C (<i>mg</i>)	274,18	231,19	226,68
Vitamina B1 (<i>mg</i>)	1,59	1,59	2,20
Vitamina B2 (<i>mg</i>)	1,57	1,59	2,49
Custo (<i>R\$</i>)	64,76	39,63	41,85

Fonte: Autoria própria.

5.3.3 Experimento 3: Minimização de carboidratos, lipídios, colesterol e custo

No terceiro experimento, foi incluída a minimização do custo financeiro da dieta gerada. Para isso os preços foram coletados a partir de um levantamento realizado em diversos sites de atacado e varejo de forma manual, refletindo o mercado no ano de 2020. Novamente, manteve-se a hierarquia de prioridades estabelecida nos experimentos anteriores, enfatizando a importância de reduzir os carboidratos e lipídeos, fundamentais na gestão da glicemia e na prevenção de comorbidades associadas ao diabetes. No entanto, ao incorporar a minimização do custo como uma função objetivo secundária, esse estudo reconhece que a acessibilidade financeira é um fator crítico para a adesão a longo prazo a qualquer regime alimentar, especialmente para aqueles que já enfrentam o ônus econômico de gerenciar uma condição crônica.

A partir da análise dos dados coletados no Experimento 3, apresentados nas Tabelas 15 a 18, constatou-se que a inclusão do critério de custo favoreceu a seleção de alimentos com um perfil nutricional adequado, porém mais econômicos. Tal escolha contribuiu para uma variedade alimentar que pode promover a adesão ao plano dietético a longo prazo, sem comprometer a qualidade da dieta em termos de macro e micronutrientes.

Observou-se também que, apesar da redução dos custos, os níveis de colesterol na dieta se mantiveram dentro de limites desejáveis. Isso indica que é possível manter uma dieta com baixo teor de colesterol mesmo sob restrições orçamentárias. Essa característica é relevante, pois o manejo dos níveis de colesterol é crucial para a prevenção de doenças cardiovasculares em pessoas com diabetes.

Entretanto, a consideração do custo levou a certas escolhas alimentares que exigem atenção, como o aumento da quantidade de alimentos baratos e densos em energia, que podem impactar negativamente o equilíbrio nutricional da dieta. Isso ressalta a necessidade de supervisão dietética para assegurar que as recomendações de baixo custo não comprometam a diversidade e a adequação nutricional.

Tabela 15 – Distribuição dos alimentos gerados no Experimento 3 para os três indivíduos

Indivíduo 1		Indivíduo 2		Indivíduo 3	
Alimento	Quant.	Alimento	Quant.	Alimento	Quant.
Agrião cru	396g	Agrião cru	264g	Agrião cru	264g
Arroz tipo 1 cozido	125g	Alface americana crua	720g	Alface americana crua	240g
Azeite de dendê	9ml	Azeite de dendê	9ml	Azeite de oliva extra virgem	8ml
Beterraba cozida	43g	Cereal matinal de milho com açúcar	43g	Batata cozida	90g
Creme de arroz em pó	120g	Creme de arroz em pó	180g	Cenoura cozida	35g
Feijão jalo cozido	60g	Feijão preto cozido	80g	Cereal matinal de milho com açúcar	43g
Feijão rosinha cozido	60g	Feijão rosinha cozido	180g	Creme de arroz em pó	160g
Feijão roxo cozido	50g	Leite de vaca integral	728ml	Feijão jalo cozido	180g
Leite de vaca integral	1820ml	Margarina com sal	20g	Feijão roxo cozido	50g
Margarina com sal	20g	Margarina sem sal	40g	Leite de vaca integral	910ml
Margarina sem sal	40g	Melado	32g	Margarina com sal	20g
Amido de milho cru	80g	Amido de milho cru	88g	Margarina sem sal	30g
Pão de forma de milho	70g	Óleo de soja	8ml	Melado	32g
				Amido de milho cru	264g
				Óleo de soja	64ml

Fonte: Autoria própria.

Tabela 16 – Comparação dos valores nutricionais obtidos no Experimento 3 para os três indivíduos

Nutriente	Indivíduo 1	Indivíduo 2	Indivíduo 3
Calorias (<i>kcal</i>)	1800,06	2100,10	3000,32
Carboidratos (<i>g</i>)	277,20	337,37	491,91
Lipídeos (<i>g</i>)	59,98	67,44	97,17
Colesterol (<i>mg</i>)	186,20	72,80	91,00
Sódio (<i>mg</i>)	1773,94	929,72	1007,26
Proteínas (<i>g</i>)	38,25	38,27	38,30
Fibras (<i>g</i>)	32,96	31,57	47,34
Cálcio (<i>mg</i>)	2883,14	1477,26	1674,22
Magnésio (<i>mg</i>)	416,66	408,05	400,18
Fósforo (<i>mg</i>)	2182,79	1432,19	1550,57
Ferro (<i>mg</i>)	18,00	18,33	18,00
Potássio (<i>mg</i>)	4107,42	3529,75	3515,89
Zinco (<i>mg</i>)	15,64	16,35	15,53
Vitamina A (μ <i>g</i>)	682,07	452,76	333,98
Vitamina C (<i>mg</i>)	238,51	224,44	227,04
Vitamina B1 (<i>mg</i>)	1,67	1,55	1,84
Vitamina B2 (<i>mg</i>)	5,27	2,84	3,28
Custo (<i>R\$</i>)	32,41	42,21	35,11

Fonte: Autoria própria.

Tabela 17 – Distribuição dos alimentos gerados no Experimento 3 para o I1 em três dias

Dia 1		Dia 2		Dia 3	
Alimento	Quant.	Alimento	Quant.	Alimento	Quant.
Agrião cru	396g	Agrião cru	264g	Agrião cru	132g
Arroz tipo 1 cozido	125g	Alface crespa crua	120g	Alface americana crua	1080g
Azeite de dendê	9ml	Alface lisa crua	240g	Arroz integral cozido	198g
Beterraba cozida	43g	Azeite de dendê	9ml	Beterraba crua	84g
Creme de arroz em pó	120g	Batata doce cozida	450g	Cenoura cozida	35g
Feijão jalo cozido	60g	Cenoura cozida	35g	Cereal matinal de milho com açúcar	86g
Feijão rosinha cozido	60g	Cenoura crua	35g	Creme de arroz em pó	20g
Feijão roxo cozido	50g	Cereal matinal de milho com açúcar	86g	Feijão fradinho cozido	60g
Leite de vaca integral	1820ml	Creme de arroz em pó	80g	Leite de vaca desnatado em pó	34g
Margarina com sal	20g	Espinafre Nova Zelândia refogado	67g	Margarina com sal	30g
Margarina sem sal	40g	Feijão carioca cozido	48g	Melado	96g
Amido de milho cru	80g	Feijão preto cozido	80g	Amido de milho cru	16g
Pão de forma de milho	70g	Feijão rosinha cozido	60g	Repolho branco cru	72g
		Margarina sem sal	50g	Óleo de soja	32ml
		Amido de milho cru	16g		
		Quiabo cru	104g		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 – Resultado para a dieta obtida no Experimento 3 para o I1 para três dias

Nutriente	Dia 1	Dia 2	Dia 3
Calorias (<i>kcal</i>)	1800,06	1800,13	1800,33
Carboidratos (<i>g</i>)	277,20	292,96	293,28
Lipídeos (<i>g</i>)	59,98	57,26	56,87
Colesterol (<i>mg</i>)	186,20	0	8,62
Sódio (<i>mg</i>)	1773,94	473,94	866,93
Proteínas (<i>g</i>)	38,25	38,36	38,28
Fibras (<i>g</i>)	32,96	48,18	30,68
Cálcio (<i>mg</i>)	2883,14	852,72	1015,91
Magnésio (<i>mg</i>)	416,66	401,89	425,55
Fósforo (<i>mg</i>)	2182,79	726,32	1288,73
Ferro (<i>mg</i>)	18,00	18,37	18,03
Potássio (<i>mg</i>)	4107,42	3550,47	3532,74
Zinco (<i>mg</i>)	15,64	15,07	15,06
Vitamina A (μ <i>g</i>)	682,07	261,66	238,98
Vitamina C (<i>mg</i>)	238,51	359,71	226,75
Vitamina B1 (<i>mg</i>)	1,67	2,05	1,53
Vitamina B2 (<i>mg</i>)	5,27	1,98	1,74
Custo (<i>R\$</i>)	32,41	28,04	42,38

Fonte: Autoria própria.

5.3.4 Experimento 4: Minimização de carboidratos, custo e da combinação de lipídeos e colesterol

Finalmente, o quarto experimento mantém o foco na relação custo-benefício, vista no Experimento 3, enquanto realça o controle de lipídeos e colesterol, semelhante ao Experimento 2. Os resultados do quarto experimento, apresentados na Tabela 19 até a Tabela 22, revelam uma significativa adaptação da dieta quando comparada aos experimentos anteriores, mantendo o foco na minimização de carboidratos e lipídios, porém, com uma atenção renovada ao custo, aspecto mantido do experimento anterior.

Aqui, a função de minimizar lipídios é combinada com a de minimizar o colesterol, semelhante ao segundo experimento. No entanto, a incorporação do custo como um parâmetro fixo no Experimento 4 sugere que a acessibilidade econômica continua sendo uma preocupação primária. Isso é evidenciado pelas variações marginais nos custos diários, como ilustrado pela Tabela 22, onde observa-se que o custo permaneceu relativamente estável, demonstrando a eficácia da metodologia em equilibrar nutrição e custo.

No entanto, é importante destacar algumas limitações identificadas. A variação nos tipos e quantidades de alimentos entre os indivíduos sugere que a personalização da dieta, embora vantajosa em termos de variedade nutricional, pode levar a desequilíbrios, especialmente se considerarmos as preferências individuais e a possível falta de acessibilidade

a certos alimentos em diferentes regiões. Além disso, ao incorporar o custo como uma função objetivo, o modelo pode favorecer opções menos custosas que nem sempre são as mais nutritivas ou as preferidas. Por exemplo, a quantidade significativa de amido de milho e óleos em alguns dias, como observado nas Tabelas 19 e 21, pode não ser a opção mais saudável para indivíduos com diabetes, considerando o índice glicêmico e o perfil lipídico desses alimentos.

Embora o colesterol tenha sido mantido em níveis baixos, uma preocupação com a saúde cardiovascular, a abordagem pode ter negligenciado outros aspectos, como a qualidade das gorduras consumidas. O controle dos lipídios foi evidente, mas a otimização não deve se concentrar exclusivamente em quantidades, mas também na qualidade das gorduras, o que é essencial para o manejo do diabetes e a saúde geral. Portanto, enquanto o quarto experimento demonstra progresso na inclusão do custo como uma variável crítica e na tentativa de diversificar a dieta, é necessário aprimorar as estratégias de otimização para garantir que as recomendações sejam nutricionalmente adequadas, praticáveis e personalizadas para as necessidades e circunstâncias individuais dos pacientes com diabetes.

Tabela 19 – Distribuição dos alimentos gerados no Experimento 4 para os três indivíduos

Indivíduo 1		Indivíduo 2		Indivíduo 3	
Alimento	Quant.	Alimento	Quant.	Alimento	Quant.
Agrião cru	132g	Agrião cru	132g	Azeite de oliva extra virgem	24ml
Azeite de oliva extra virgem	24ml	Batata doce cozida	450g	Batata doce cozida	900g
Batata doce cozida	450g	Beterraba crua	126g	Cereal matinal de milho com açúcar	86g
Beterraba cozida	43g	Cereal matinal de milho com açúcar	86g	Creme de arroz em pó	100g
Cenoura crua	38g	Chuchu cozido	57g	Feijão jalo cozido	60g
Cereal matinal de milho com açúcar	86g	Creme de arroz em pó	40g	Feijão preto cozido	400g
Creme de arroz em pó	20g	Farinha de puba	40g	Leite de vaca integral	364ml
Feijão preto cozido	480g	Feijão preto cozido	320g	Margarina sem sal	10g
Feijão rosinha cozido	60g	Grão de bico cru	36g	Melado	32g
Leite de vaca integral	364ml	Leite de vaca integral	364ml	Amido de milho cru	32g
Margarina sem sal	40g	Margarina sem sal	70g	Óleo de milho	56ml
Melado	32g	Melado	32g	Óleo de soja	8ml
Rabanete cru	90g	Óleo de soja	8ml		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 20 – Comparação dos valores nutricionais obtidos no Experimento 4 para os três indivíduos

Nutriente	Indivíduo 1	Indivíduo 2	Indivíduo 3
Calorias (<i>kcal</i>)	1800,04	2100,06	3000,19
Carboidratos (<i>g</i>)	286,22	337,56	491,81
Lipídeos (<i>g</i>)	59,29	69,71	99,80
Colesterol (<i>mg</i>)	36,40	36,40	36,40
Sódio (<i>mg</i>)	667,78	682,72	631,77
Proteínas (<i>g</i>)	38,31	38,40	38,28
Fibras (<i>g</i>)	61,91	52,79	64,85
Cálcio (<i>mg</i>)	967,84	962,91	887,79
Magnésio (<i>mg</i>)	402,22	400,01	491,09
Fósforo (<i>mg</i>)	1048,56	1007,17	1123,44
Ferro (<i>mg</i>)	18,67	18,12	18,11
Potássio (<i>mg</i>)	3526,43	3515,81	3590,77
Zinco (<i>mg</i>)	15,18	15,19	15,28
Vitamina A (μ <i>g</i>)	285,76	442,76	128,77
Vitamina C (<i>mg</i>)	210,08	206,08	226,75
Vitamina B1 (<i>mg</i>)	1,70	1,84	2,03
Vitamina B2 (<i>mg</i>)	2,16	2,14	1,87
Custo (<i>R\$</i>)	18,79	17,92	18,05

Fonte: Autoria própria.

Tabela 21 – Distribuição dos alimentos gerados no Experimento 4 para o I1 em três dias

Dia 1		Dia 2		Dia 3	
Alimento	Quant.	Alimento	Quant.	Alimento	Quant.
Agrião cru	132g	Agrião cru	132g	Agrião cru	132g
Azeite de oliva extra virgem	24ml	Alface lisa crua	120g	Cenoura cozida	595g
Batata doce cozida	450g	Batata doce cozida	150g	Cereal matinal de milho	43g
Beterraba cozida	43g	Batata inglesa cozida	90g	Espinafre Nova Zelândia refogado	67g
Cenoura crua	38g	Cereal matinal de milho com açúcar	86g	Farinha de mandioca crua	40g
Cereal matinal de milho com açúcar	86g	Farinha de mandioca crua	40g	Feijão carioca cozido	48g
Creme de arroz em pó	20g	Feijão fradinho cozido	300g	Feijão jalo cozido	180g
Feijão preto cozido	480g	Feijão roxo cozido	50g	Margarina com sal	40g
Feijão rosinha cozido	60g	Margarina com sal	10g	Melado	32g
Leite de vaca integral	364ml	Margarina sem sal	10g	Repolho roxo cru	120g
Margarina sem sal	40g	Melado	64g	Repolho roxo refogado	150g
Melado	32g	Amido de milho cru	16g	Óleo de milho	8ml
Rabanete cru	90g	Quiabo cru	312g	Óleo de soja	16ml
		Repolho branco cru	216g		
		Óleo de soja	40ml		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 22 – Resultado para a dieta obtida no Experimento 4 para o I1 para três dias

Nutriente	Dia 1	Dia 2	Dia 3
Calorias (<i>kcal</i>)	1800,04	1800,86	1801,03
Carboidratos (<i>g</i>)	286,22	293,37	294,26
Lipídeos (<i>g</i>)	59,29	59,06	59,96
Colesterol (<i>mg</i>)	36,40	0	0
Sódio (<i>mg</i>)	667,78	483,33	1296,34
Proteínas (<i>g</i>)	38,31	38,37	38,32
Fibras (<i>g</i>)	61,91	61,18	61,96
Cálcio (<i>mg</i>)	967,84	866,27	865,86
Magnésio (<i>mg</i>)	402,22	457,93	438,91
Fósforo (<i>mg</i>)	1048,56	759,77	865,60
Ferro (<i>mg</i>)	18,67	18,25	18,41
Potássio (<i>mg</i>)	3526,43	3504,48	3562,79
Zinco (<i>mg</i>)	15,18	15,39	15,61
Vitamina A (μ <i>g</i>)	285,76	97,60	181,10
Vitamina C (<i>mg</i>)	210,08	214,55	217,79
Vitamina B1 (<i>mg</i>)	1,70	1,84	2,09
Vitamina B2 (<i>mg</i>)	2,16	1,45	1,73
Custo (<i>R\$</i>)	18,79	18,21	18,86

Fonte: Autoria própria.

5.3.5 Discussão sobre o segundo modelo

Observa-se, empiricamente, que o segundo modelo representou um avanço significativo em relação ao seu antecessor. A incorporação do método lexicográfico para a inclusão de novos objetivos na otimização de dietas proporcionou uma abordagem mais refinada e hierarquizada, permitindo que múltiplas funções objetivos fossem atendidas de maneira sequencial e ponderada.

Essa estratégia foi essencial para equilibrar as prioridades nutricionais sem comprometer a diversidade alimentar, refletindo-se na produção de planos dietéticos que variam substancialmente de um dia para o outro. A inclusão de penalidades nos alimentos, um diferencial deste modelo, permitiu a criação de dietas variadas para diferentes dias, atendendo a necessidades específicas sem a repetição monótona de alimentos. Além disso, a integração do custo como uma função objetivo a ser otimizada mostrou ser relevante, pois a viabilidade financeira é um componente crítico para a adesão sustentável a uma dieta, especialmente em contextos de gestão de doenças crônicas, como o diabetes.

Em relação às limitações identificadas, é importante considerar que, apesar dos avanços do segundo modelo, algumas das dietas geradas apresentam desafios práticos. A otimização focada na minimização de carboidratos, lipídeos, colesterol e custo, embora alinhada com os parâmetros nutricionais recomendados para essa condição, resultou, em certos ca-

sos, em quantidades diárias substanciais de determinados alimentos. Essa característica pode impor dificuldades logísticas e de aderência, visto que a ingestão excessiva de um único tipo de alimento pode reduzir a palatabilidade e a praticidade da dieta, aspectos críticos para o seguimento a longo prazo. Portanto, apesar do modelo apresentar uma estrutura promissora para a criação de planos dietéticos para diabéticos, enfatizando a minimização de macro e micronutrientes críticos e de custos, a sua implementação prática ainda carece de refinamento.

5.4 Terceiro Modelo

No desenvolvimento da versão final do modelo (ou terceiro modelo, como chamado aqui), buscou-se uma ponderação entre a complexidade nutricional e a praticidade da aplicação dietética no manejo do diabetes mellitus. A fim de permitir a comparação do modelo proposto aqui com outros trabalhos da literatura, optou-se por seguir o trabalho de Silva et al. (2017a), o que implicou a eliminação de restrições nutricionais associadas a vitaminas A, B1, B2 e C, além de minerais como o potássio e nutrientes como o colesterol. Além disso, a base de dados de Silva et al. (2017a) conta com 294 alimentos, todos extraídos da TBCA, e que também passaram a ser adotados aqui. Esses alimentos, conforme descrito na Seção 4.3, foram categorizados em seis grupos alimentares.

Com o objetivo de oferecer um mecanismo mais completo para a tomada de decisão, foram comparados, aqui, os dois métodos de otimização descritos na Seção 2.3, ou seja, o método lexicográfico e o método de pesos. O método lexicográfico, já utilizado anteriormente, prioriza as funções objetivo sequencialmente, garantindo que a primeira seja otimizada antes de considerar a segunda. Tal abordagem é útil para situações onde uma hierarquia de importância entre os objetivos é claramente definida. Por outro lado, o método de pesos introduz uma abordagem mais flexível, atribuindo valores ponderados a cada função objetivo. Isso permite que ambas as metas de minimização, carboidratos e lipídeos, sejam tratadas simultaneamente, produzindo uma solução de compromisso que leva em conta a importância relativa de cada um desses macronutrientes, conforme determinado pelos pesos atribuídos.

Foi mantido, ainda o sistema de penalidades já utilizado na versão anterior do modelo, a fim de evitar a repetição de alimentos entre as dietas consecutivas. Isso promoveu uma diversidade alimentar e manteve o interesse e a satisfação com a dieta. Tais contribuições possibilitaram desenvolver planos alimentares que contemplassem a variedade de alimentos ao longo de vários dias, correspondendo mais realisticamente ao padrão alimentar diário e às preferências individuais.

Mantivemos também os objetivos de carboidratos e lipídeos, os quais desempenham papéis cruciais na regulação metabólica e na saúde geral. No entanto, é importante observar que a interdependência desses objetivos pode resultar em padrões interessantes

de seleção alimentar. Por exemplo, ao minimizar a ingestão de carboidratos, o modelo pode tender a selecionar alimentos mais ricos em gorduras para atender às necessidades energéticas, o que pode impactar na composição geral da dieta. Esse comportamento reflete a complexidade das interações entre os macronutrientes e destaca a importância de uma abordagem holística na otimização da dieta.

Finalmente, deve-se salientar que o custo financeiro como função objetivo foi removido devido à falta de dados consistentes e dinâmicos sobre preços. De fato, a base de dados utilizada nessa seção, por possuir mais alimentos, incorpora diversos itens que são processados (como omelete, por exemplo), o que torna impraticável sugerir preços no contexto da geração de uma dieta individual. Apesar dessa limitação, o modelo sustenta sua robustez e flexibilidade, provendo um arcabouço metodológico que pode ser adaptado e expandido em pesquisas futuras.

5.4.1 Comparação com a literatura

A fim de verificar se o modelo proposto, de fato, encontra soluções adequadas, é importante comparar seus resultados com outros trabalhos. Entretanto, poucos autores disponibilizam seus dados; além disso, muitos dos trabalhos relacionados consideram alimentos comuns em seus países de origem, o que inviabiliza compará-los com dados da TBCA. Assim, em um primeiro momento, optou-se por promover uma comparação em um contexto diferente do objetivo original deste trabalho, utilizando, para isso, os trabalhos de Silva et al. (2017a) e Silva et al. (2017b).

Enquanto o foco deste trabalho reside na otimização de dietas para diabéticos, com ênfase na regulação de macronutrientes como carboidratos e lipídeos, Silva et al. (2017a) e Silva et al. (2017b) concentram-se na minimização calórica para indução de perda de peso, limitando-se, inferiormente, a 1200 kcal diárias – um patamar considerado seguro para evitar deficiências nutricionais enquanto promove o gasto energético necessário para a perda de peso.

Para a realização de uma comparação equitativa, adaptou-se o modelo proposto aqui para a minimização de calorias. Essa adaptação possibilitou uma análise direta do desempenho em um contexto de restrição calórica, oferecendo uma perspectiva sobre a flexibilidade e aplicabilidade desse método em diferentes cenários nutricionais. O trabalho de Silva et al. (2017b) avalia a eficácia de dois métodos computacionais distintos: um Algoritmo Genético (AG) e a Evolução Diferencial (ED). Ambos são estratégias de otimização baseadas em populações que simulam processos evolutivos e adaptações naturais para encontrar soluções ótimas. O AG é amplamente reconhecido por sua robustez e capacidade de navegar eficientemente por espaços de busca complexos, enquanto o ED é elogiado por sua simplicidade e eficácia na convergência para soluções globais ótimas.

A comparação, portanto, não apenas sublinha as diferenças nos objetivos dietéticos (controle glicêmico versus restrição calórica) mas também oferece uma visão sobre como

diferentes algoritmos de otimização podem ser calibrados e aplicados em distintos problemas nutricionais. Essa análise comparativa serve não apenas para validar a versatilidade do nosso modelo, mas também para explorar as potencialidades de adaptação de estratégias algorítmicas quando confrontadas com requisitos nutricionais variados. Os resultados, apresentados na Tabela 23, evidenciam uma significativa melhoria na restrição calórica, alcançando um perfil de dieta com um valor energético inferior, graças à aplicação de um método de otimização matemática robusto.

É importante reconhecer que a abordagem de Silva et al. (2017b) permite uma maior diversificação nas escolhas alimentares, uma vez que não se limita a porções inteiras de alimentos. Isso permite uma melhor adaptação às preferências individuais e às variabilidades culturais alimentares. Essa adaptabilidade é um aspecto crucial na formulação de dietas práticas e sustentáveis, especialmente considerando as complexidades envolvidas no manejo da diabetes. Portanto, o modelo proposto nesta dissertação, apesar de suas vantagens na precisão calórica e na simplificação do planejamento dietético, deve ser considerado complementar às estratégias empregadas por Silva et al. (2017b). A integração dos pontos fortes de ambos os modelos poderia levar a um sistema de planejamento de dieta ainda mais eficiente e personalizado, ressaltando a importância de colaborações interdisciplinares na pesquisa e desenvolvimento em nutrição e saúde.

Tabela 23 – Resultados apresentados por Silva et al. (2017b) e comparação com o modelo desenvolvido

Gerada pelo AG 1640,91 Kcal		Gerada pelo ED 1554,23 Kcal		Gerada pelo modelo 1200,00 Kcal	
Café da Manhã					
Iorgute natural desnatado	75ml	Café infusão de 10%	50ml	Chá preto infusão de 10%	100ml
Manga crua	200g	Pêssego aurora cru	245g	Manga Tommy Atkins crua	100g
Curau de milho verde	110g	Pão de forma integral	50g	Pão de forma integral	100g
Primeiro Lanche					
Nêspera crua	280g	Banana nanica crua	300g	Queijo petitsuisse de morango	100g
Almoço					
Suco de limão cravo	190ml	Suco de limão galero	50ml	Suco de limão cravo	100ml
Batata baroa cozida	125g	Arroz tipo 2 cozido	50g	Batata inglesa cozida	100g
Feijão rosinha cozido	90g	Feijão fradinho cozido	250g	Ervilha em vagem	100g
Mostarda em folhas	195g	Alfavaca crua	235g	Palmito Juçara em conserva	100g
Almeirão cru	300g	Brócolis cozido	300g	Pepino cru	100g
Filé de abadejo	50g	Coxa de frango sem pele	50g	Caranguejo cozido	100g
Segundo Lanche					
Suco de limão cravo	225ml	Água tônica	250ml	Chá preto infusão de 5%	100ml
Cereal de milho	60g	Pão de soja	50g	Curau de milho verde	100g
Jantar					
Batata baroa cozida	200g	Batata inglesa sauté	50g	Arroz integral cozido	100g
Ervilha em vagem	200g	Feijão rajado cozido	140g	Ervilha em vagem	100g
Aipo cru	275g	Beterraba cozida	145g	Couve crua na manteiga	100g
Sardinha crua	50g	Quibe assado	50g	Quibe assado	100g
Ceia					
Banana figo crua	80g	Fatia de queijo suíço	50g	Abacaxi cru	100g

Fonte: Autoria própria.

Uma vez que o modelo proposto foi validado frente a outros trabalhos da literatura, pôde-se finalmente considerá-lo para gerar dietas que seguem o objetivo deste trabalho, ou seja, voltadas para portadores de diabetes. Foram realizados dois conjuntos de experimento: o primeiro utilizando o método dos pesos e o segundo utilizando a abordagem lexicográfica. As seções seguintes descrevem os resultados.

5.4.2 Experimento envolvendo o método da soma ponderada

Primeiramente, aplicou-se o método dos pesos para a definição das funções objetivos, com uma ênfase particular na gestão dos carboidratos devido ao seu impacto significativo na glicemia dos diabéticos. O modelo matemático adota uma abordagem ponderada para equilibrar a ingestão de macronutrientes, onde os carboidratos recebem um peso maior em comparação aos lipídeos. A expressão matemática que encapsula essa priorização é dada pela equação (10).

$$\text{minimizar } \sum_{j=1}^n \alpha * Carb_j + (1 - \alpha) * Lip_j \quad (10)$$

Nesta fórmula, $Carb_j$ representa a quantidade de carboidratos e Lip_j , a de lipídeos do alimento j . Exploramos uma série de testes variando o parâmetro alfa de 0,1 a 0,9, analisando sua influência na relação entre carboidratos e lipídeos na dieta. Os resultados obtidos foram representados graficamente, conforme mostrado no gráfico 1. Observa-se uma tendência clara de que quanto maior a quantidade de carboidratos na dieta, menor é a quantidade de lipídeos e vice-versa. Essa relação inversa entre esses macronutrientes é crucial para o controle e a manutenção de uma dieta balanceada, especialmente em pacientes com condições metabólicas como o diabetes. Portanto, ao ajustar os níveis de alfa, podemos modular a proporção de carboidratos e lipídeos na dieta, contribuindo para o gerenciamento eficaz dessas condições.

O coeficiente $\alpha = 0,7$ foi aplicado aos carboidratos, atribuindo-lhes maior peso na função objetivo, enfatizando a sua regulação em detrimento dos lipídeos, que recebem um peso menor (0,3). Ao adotar essa abordagem, o modelo consegue fornecer recomendações dietéticas que não só contemplam a manutenção do controle glicêmico mas também promovem uma dieta equilibrada e nutritiva, enfatizando a importância dos carboidratos enquanto gerencia a ingestão de lipídeos, ambos componentes chave na dieta de pessoas com diabetes.

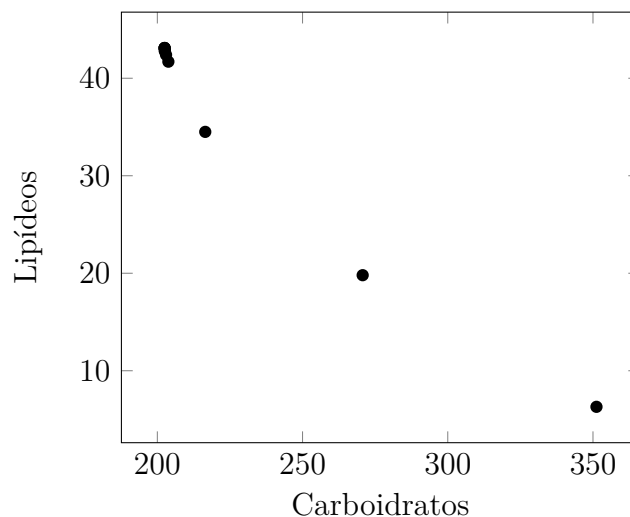
Os resultados refletem a aplicação do modelo proposto para os três indivíduos considerados neste trabalho (Tabela 3 ao longo de cinco dias). observa-se que intervenção dietética foi personalizada para cada perfil, considerando suas necessidades e restrições metabólicas específicas. As dietas propostas estão delineadas nas Tabelas 24, 25 para o indivíduo I1, Tabelas 27, 28 para I2 e Tabelas 30, 31 para I3. Cada alimento foi padronizado para uma medida de 100g ou 100ml, com o objetivo de simplificar o modelo de

otimização. Os resultados nutricionais correspondentes são apresentados nas Tabelas 26, 29 e 32.

Observa-se que foi possível manter os valores de carboidratos consistentemente próximos do mínimo desejado para I1 e I2, refletindo a prioridade dada a este macronutriente. No entanto, para o I3, notou-se um incremento significativo na quantidade de carboidratos nos últimos dias, o que pode ser atribuído às limitações na variedade de alimentos disponíveis na base de dados. Paralelamente, houve um aumento gradual na quantidade de lipídeos para todos os indivíduos ao longo dos dias, evidenciando a flexibilidade do modelo em adaptar-se às restrições impostas pelos pesos.

Apesar dos resultados promissores, algumas limitações do modelo devem ser destacadas. A base de dados restrita impactou a capacidade do modelo de encontrar soluções ótimas, principalmente para o I3, que apresentou desafios na minimização efetiva dos carboidratos e lipídeos. A uniformização das porções de alimentos em 100g ou 100ml também representa uma limitação, não refletindo as práticas alimentares realistas ou as necessidades nutricionais individualizadas, que podem requerer porções ajustadas. Essas limitações apontam para a necessidade de aprimoramentos futuros no modelo, como a expansão da base de dados de alimentos e a introdução de um sistema de porções mais flexível e adaptável às necessidades individuais, especialmente no contexto de dietas para diabéticos, onde o controle preciso dos macronutrientes é vital.

Figura 1 – Gráfico comparando os objetivos carboidratos e lipídeos no método de soma ponderada para o I1



Fonte: Autoria própria.

Tabela 24 – Resultados para o I1 utilizando o método da soma ponderada dos dias 1 ao 3

Dia 1	Dia 2	Dia 3
Café da Manhã		
Café infusão de 10% Tangerina Poncã crua Pão de forma com glúten	Chá de erva-doce infusão de 5% Abacaxi cru Curau de milho verde	Chá mate infusão de 5% Pitanga crua Pão de forma de trigo integral
Primeiro Lanche		
Queijo ricota	Queijo petitsuisse de morango	Queijo minas meiacura
Almoço		
Suco de laranja pêra Batata inglesa cozida Ervilha em vagem Alfavaca crua Palmito Juçara em conserva Carne patinho sem gordura grelhado	Suco de laranja lima Batata inglesa cozida Soja extra solúvel em pó Couve na manteiga crua Palmito Juçara em conserva Pintado assado	Suco de uva concentrado envasado Arroz integral cozido Feijão rajado cozido Beterraba crua Palmito Juçara em conserva Carne contra-filé sem gordura grelhado
Segundo Lanche		
Café infusão de 10% Pão de forma com glúten	Água de coco Pão de forma com glúten	Chá mate infusão de 5% Curau de milho verde
Jantar		
Lasanha de massa fresca cozida Ervilha em vagem Palmito juçara em conserva Carne capa de contra-filé sem gordura grelhada	Batata inglesa sauté Feijão roxo cozido Couve na manteiga crua Pintado assado	Arroz integral cozido Feijão rosinha cozido Beterraba crua Carne contra-filé sem gordura grelhado
Ceia		
Queijo ricota	Queijo petitsuisse de morango	Queijo ricota

Fonte: Autoria própria.

Tabela 25 – Resultados para o I1 utilizando o método da soma ponderada dos dias 4 e 5

Dia 4	Dia 5
Café da Manhã	
Chá de erva-doce infusão de 5%	Café infusão de 10%
Morango cru	Abacaxi cru
Pão de soja	Pão de forma de aveia
Primeiro Lanche	
Morango cru	Abacaxi cru
Almoço	
Suco de limão cravo	Suco de limão galego
Batata inglesa sauté	Batata inglesa cozida
Soja extra solúvel natural fluído	Feijão fradinho cozido
Espinafre Nova Zelândia cru	Couve na manteiga crua
Palmito Juçara em conserva	Rúcula crua
Lombo de porco assado	Sardinha assada
Segundo Lanche	
Café preto infusão de 5%	Café infusão de 10%
Pão de forma de trigo integral	Bolo pronto de milho
Jantar	
Batata inglesa sauté	Batata inglesa cozida
Soja extra solúvel em pó	Feijão rosinha cozido
Alface crespa crua	Palmito juçara em conserva
Carne capa de contra-filé sem gordura grelhada	Carne patinho sem gordura grelhado
Ceia	
Morango cru	Queijo mozzarella

Fonte: Autoria própria.

Tabela 26 – Resultado dos nutrientes para o I1 utilizando o método da soma ponderada

Nutrientes	Dia 1	Dia 2	Dia3	Dia 4	Dia 5
Calorias (<i>kcal</i>)	1800,00	1800,00	1807,00	1802,00	1816,00
Carboidratos (<i>g</i>)	202,60	202,50	202,50	202,60	202,50
Lipídeos (<i>g</i>)	42,80	47,09	50,90	55,00	56,20
Sódio (<i>mg</i>)	1997,00	1652,00	1978,00	1982,00	1993,00
Proteínas (<i>g</i>)	151,40	152,10	139,10	140,30	130,20
Fibras (<i>g</i>)	38,70	35,40	40,30	35,30	31,60
Cálcio (<i>mg</i>)	1294,00	2660,00	1325,00	874,00	1915,00
Magnésio (<i>mg</i>)	406,00	578,00	465,00	563,00	409,00
Fósforo (<i>mg</i>)	1654,00	2721,00	1831,00	1806,00	2041,00
Ferro (<i>mg</i>)	24,06	18,68	18,09	18,04	18,02
Zinco (<i>mg</i>)	24,40	20,10	21,20	20,90	20,00

Fonte: Autoria própria.

Tabela 27 – Resultados para o I2 utilizando o método da soma ponderada dos dias 1 ao 3

Dia 1	Dia 2	Dia 3
Café da Manhã		
Café infusão de 10%	Água de coco	Café infusão de 10%
Melancia crua	Abacaxi cru	Cajá-manga crua
Pão de forma com glúten	Curau de milho verde	Pão de forma com glúten
Primeiro Lanche		
Queijo petitsuisse de morango	Queijo ricota	Queijo minas frescal
Almoço		
Suco de tangerina poncã	Suco concentrado de maracujá envasado	Suco de laranja baía
Lasanha de massa fresca cozida	Arroz tipo 1 cozido	Arroz tipo 2 cozido
Ervilha em vagem	Soja extra solúvel em pó	Feijão rajado cozido
Couve na manteiga crua	Beterraba crua	Espinafre Nova Zelândia cru
Palmito Juçara em conserva	Palmito Juçara em conserva	Palmito Juçara em conserva
Pintado assado	Carne contra-filé sem gordura grelhado	Carne patinho sem gordura grelhado
Segundo Lanche		
Chá mate infusão de 5%	Refrigerante tipo água atônica	Suco de laranja baía
Pão de forma com glúten	Pão de trigo sovado	Pão de soja
Jantar		
Batata baroa cozida	Arroz tipo 1 cozido	Arroz tipo 2 cozido
Soja extra solúvel em pó	Ervilha em vagem	Lentilha cozido
Couve na manteiga crua	Brócolis cru	Palmito Juçara em conserva
Pintado assado	Carne contra-filé sem gordura grelhado	Sardinha assada
Ceia		
Queijo ricota	Queijo ricota	Queijo minas frescal

Fonte: Autoria própria.

Tabela 28 – Resultados para o I2 utilizando o método da soma ponderada dos dias 4 e 5

Dia 4	Dia 5
Café da Manhã	
Água de coco	Chá mate infusão de 5%
Abacaxi cru	Banana maçã crua
Pão de trigo sovado	Bolo pronto de milho
Primeiro Lanche	
Queijo mozzarella	Morango cru
Almoço	
Suco de laranja pêra	Suco de laranja lima
Lasanha de massa fresca cozida	Arroz integral cozido
Soja extra solúvel em pó	Feijão rosinha cozido
Beterraba crua	Couve na manteiga crua
Brócolis cru	Palmito Juçara em conserva
Peito de frango sem pele grelhado	Sardinha frita
Segundo Lanche	
Suco de uva concentrado envasado	Café mate infusão de 5%
Curau de milho verde	Pão de aveia
Jantar	
Batata inglesa cozida	Arroz integral cozido
Feijão jalo cozido	Feijão rosinha cozido
Palmito Juçara em conserva	Palmito juçara em conserva
Peito de frango sem pele grelhado	Sardinha frita
Ceia	
Umbu cru	Morango cru

Fonte: Autoria própria.

Tabela 29 – Resultado dos nutrientes para o I2 utilizando o método da soma ponderada

Nutrientes	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
Calorias (<i>kcal</i>)	2100,00	2100,00	2102,00	2100,00	2106,00
Carboidratos (<i>g</i>)	236,50	236,50	236,50	236,50	236,60
Lipídeos (<i>g</i>)	54,00	57,80	59,80	63,50	69,00
Sódio (<i>mg</i>)	1720,00	1778,00	1934,00	1965,00	1991,00
Proteínas (<i>g</i>)	175,00	165,00	152,20	156,00	138,00
Fibras (<i>g</i>)	35,00	34,10	38,70	39,80	40,70
Cálcio (<i>mg</i>)	2265,00	1220,00	2140,00	1623,00	2125,00
Magnésio (<i>mg</i>)	573,00	481,00	427,00	504,00	532,00
Fósforo (<i>mg</i>)	2522,00	1985,00	1814,00	2261,00	2391,00
Ferro (<i>mg</i>)	18,03	18,30	25,18	18,11	18,02
Zinco (<i>mg</i>)	19,40	24,20	18,20	18,00	15,00

Fonte: Autoria própria.

Tabela 30 – Resultados para o I3 utilizando o método da soma ponderada dos dias 1 ao 3

Dia 1	Dia 2	Dia 3
Café da Manhã		
Refrigerante de laranja	Refrigerante tipo água tônica	Refrigerante de laranja
Tamarindo cru	Banana da terra cru	Tamarindo cru
Pão de forma com glúten	Pão de forma com glúten	Pão de forma de aveia
Primeiro Lanche		
Queijo ricota	Queijo minas frescal	Queijo minas frescal
Almoço		
Suco de laranja da terra	Suco de laranja baía	Suco de laranja lima
Lasanha de massa fresca cozida	Arroz tipo 2 cozido	Arroz tipo 1 cozido
Soja extra solúvel em pó	Soja extra solúvel em pó	Soja extra solúvel em pó
Beterraba crua	Cará cozido	Beterraba crua
Palmito Juçara em conserva	Palmito Juçara em conserva	Couve refogada na manteiga
Pintado assado	Carne contra-filé sem gordura grelhado	Lombo de porco assado
Segundo Lanche		
Refrigerante de limão	Suco de uva concentrado envasado	Suco de laranja da terra
Pão de forma com glúten	Pão de trigo sovado	Pão de forma de aveia
Jantar		
Arroz tipo 1 cozido	Lasanha de massa fresca cozida	Arroz tipo 1 cozido
Soja extra solúvel em pó	Soja extra solúvel em pó	Ervilha em vagem
Salada de tomate	Cará cozido	Palmito Juçara em conserva
Pintado assado	Carne contra-filé sem gordura grelhado	Lombo de porco assado
Ceia		
Queijo minas frescal	Queijo ricota	Queijo minas frescal

Fonte: Autoria própria.

Tabela 31 – Resultados para o I3 utilizando o método da soma ponderada dos dias 4 e 5

Dia 4	Dia 5
Café da Manhã	
Água de coco	Refrigerante de laranja
Tamarindo cru	Banana ouro crua
Biscoito doce maisena	Biscoito doce recheado de morango
Primeiro Lanche	
Kiwi cru	Queijo prato
Almoço	
Suco de laranja valência	Suco de laranja terra
Arroz integral cozido	Mandioca frita
Ervilha em vagem	Soja extra solúvel em pó
Couve na manteiga crua	Beterraba crua
Palmito Juçara em conserva	Palmito Juçara em conserva
Pintado assado	Carne contra-filé sem gordura grelhado
Segundo Lanche	
Café infusão de 10%	Suco de laranja terra
Biscoito doce maisena	Pão de trigo sovado
Jantar	
Batata inglesa frita	Arroz tipo 2 cozido
Soja extra solúvel em pó	Lentilha cozida
Couve na manteiga crua	Beterraba crua
Pintado assado	Carne contra-filé sem gordura grelhado
Ceia	
Queijo minas meia cura	Banana da terra crua

Fonte: Autoria própria.

Tabela 32 – Resultado dos nutrientes para o I3 utilizando o método da soma ponderada

Nutrientes	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
Calorias (<i>kcal</i>)	3000,00	3001,00	3000,00	3001,00	3001,00
Carboidratos (<i>g</i>)	337,50	337,50	351,70	370,40	378,20
Lipídeos (<i>g</i>)	96,60	97,60	99,50	100,10	100,00
Sódio (<i>mg</i>)	1441,00	1792,00	1981,00	1982,00	1995,00
Proteínas (<i>g</i>)	215,10	208,90	189,20	174,50	164,50
Fibras (<i>g</i>)	39,10	32,30	52,30	51,00	37,60
Cálcio (<i>mg</i>)	2241,00	1869,00	2120,00	1838,00	1568,00
Magnésio (<i>mg</i>)	728,00	652,00	591,00	715,00	613,00
Fósforo (<i>mg</i>)	2666,00	2485,00	2100,00	2630,00	2169,00
Ferro (<i>mg</i>)	19,50	18,01	18,43	19,17	18,09
Zinco (<i>mg</i>)	22,30	28,90	17,80	19,30	27,30

Fonte: Autoria própria.

5.4.3 Experimento envolvendo o método lexicográfico

Proseguindo com a metodologia estabelecida na Seção 5.3, o método lexicográfico é novamente empregado na versão final do modelo. Ao aplicar esta técnica, assegura-se que o primeiro objetivo (a minimização dos carboidratos) será atingido antes de se considerar o segundo, ou seja, a redução dos lipídeos. Isso permite um controle mais rigoroso sobre os componentes dietéticos que exercem influência direta sobre os níveis de glicose no sangue (Filippo et al., 2021). A decisão de restringir o foco a apenas dois objetivos nutricionais surge da análise dos dados coletados e da revisão literária, indicando a necessidade de um controle mais estrito sobre estes dois elementos dietéticos. Ao mesmo tempo, permite uma simplificação do modelo, facilitando a interpretação dos resultados e a aplicação prática das dietas geradas.

Os resultados do método lexicográfico são apresentados como segue: para o Indivíduo 1 (I1) nas Tabelas 33 e 34, para o Indivíduo 2 (I2) nas Tabelas 36 e 37, e para o Indivíduo 3 (I3) nas Tabelas 39 e 40. As quantidades de nutrientes correspondentes a estas distribuições de alimentos são detalhadas nas Tabelas 35, 38 e 41, respectivamente, para cada um dos três indivíduos ao longo de cinco dias.

A análise dos carboidratos nos revela uma estabilidade notável nos valores para I1 e I2, alinhando-se com o patamar mínimo estabelecido, semelhante ao observado pelo método dos pesos. Um aspecto interessante a ser destacado é o procedimento de ajuste após a otimização inicial dos carboidratos: ao mudar o foco para a minimização dos lipídeos, permitiu-se um leve incremento de cinco gramas acima do valor encontrado dos carboidratos previamente minimizado, chegando, assim, um novo limiar para o segundo objetivo. Tal estratégia demonstrou eficiência, proporcionando uma flexibilidade que favoreceu uma otimização mais acentuada dos lipídeos sem comprometer excessivamente a ingestão de carboidratos.

Não obstante, persistem as limitações já observadas. A seleção de alimentos permanece restrita a quantidades fixas de 100g ou 100ml, o que pode não refletir as nuances da dieta real de um indivíduo. Adicionalmente, a capacidade de diversificação da dieta para o I3 mostrou-se limitada com o progresso dos dias, evidenciando uma potencial lacuna na variedade da base de dados alimentar disponível. Essa limitação se torna particularmente crítica quando se considera a necessidade de manter níveis reduzidos tanto de carboidratos quanto de lipídeos, reforçando a importância de uma base de dados ampla e diversificada para o sucesso do modelo em cenários reais de planejamento dietético para diabéticos.

Tabela 33 – Resultados para o I1 utilizando o método lexicográfico dos dias 1 ao 3

Dia 1	Dia 2	Dia 3
Café da Manhã		
Café infusão de 10%	Água de coco	Chá preto infusão de 5%
Morango cru	Abacaxi cru	Morango cru
Pão de forma com glúten	Pão de forma com glúten	Pão de forma de aveia
Primeiro Lanche		
Queijo ricota	Queijo petitsuisse morango	Abacaxi cru
Almoço		
Suco de laranja da terra	Suco de laranja baía	Suco de laranja pêra
Batata inglesa sauté	Batata inglesa cozida	Arroz integral cozido
Ervilha em vagem	Lentilha cozida	Feijão roxo cozido
Espinafre Nova Zelândia refogado	Couve na manteiga crua	Beterraba crua
Palmito Juçara em conserva	Palmito Juçara em conserva	Palmito Juçara em conserva
Carne contra-filé sem gordura grelhado	Pintado assado	Lombo de porco assado
Segundo Lanche		
Café infusão de 10%	Chá mate infusão de 5%	Chá preto infusão de 5%
Pão de forma com glúten	Curau de milho verde	Curau de milho verde
Jantar		
Lasanha de massa fresca cozida	Batata inglesa cozida	Arroz integral cozido
Ervilha em vagem	Soja extra solúvel em pó	Feijão jalo cozido
Palmito Juçara em conserva	Couve na manteiga crua	Espinafre Nova Zelândia cru
Lombo de porco assado	Pintado assado	Carne patinho sem gordura grelhado
Ceia		
Queijo ricota	Queijo petitsuisse de morango	Queijo mozzarella

Fonte: Autoria própria.

Tabela 34 – Resultados para o I1 utilizando o método lexicográfico dos dias 4 e 5

Dia 4	Dia 5
Café da Manhã	
Chá mate infusão de 5%	Água de coco
Melancia crua	Morango cru
Pão de forma de trigo integral	Pão de forma de aveia
Primeiro Lanche	
Queijo ricota	Morango cru
Almoço	
Suco de limão cravo	Suco de laranja pêra
Batata inglesa sauté	Batata baroa cozida
Soja extra solúvel em pó	Feijão rosinha cozido
Alface crespa crua	Couve na manteiga crua
Pepino cru	Palmito Juçara em conserva
Carne contra-filé sem gordura grelhado	Lambari congelado frito
Segundo Lanche	
Café de erva-doce infusão de 5%	Água de coco
Pão de forma de trigo integral	Pão de forma de aveia
Jantar	
Batata inglesa cozida	Batata baroa cozida
Ervilha em vagem	Soja extra solúvel natural fluído
Palmito Juçara em conserva	Couve na manteiga crua
Peito de frango sem pele cozido	Sardinha frita
Ceia	
Laranja pêra crua	Abacate cru

Fonte: Autoria própria.

Tabela 35 – Resultado dos nutrientes para o I1 utilizando o método lexicográfico

Nutrientes	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
Calorias (<i>kcal</i>)	1800,00	1800,00	1801,00	1802,00	1847,00
Carboidratos (<i>g</i>)	203,00	203,40	203,40	203,50	223,80
Lipídeos (<i>g</i>)	42,40	46,20	50,40	51,60	59,90
Sódio (<i>mg</i>)	1999,00	1645,00	1852,00	2000,00	1930,00
Proteínas (<i>g</i>)	152,00	152,60	134,20	150,70	106,60
Fibras (<i>g</i>)	39,00	31,30	48,70	40,50	40,10
Cálcio (<i>mg</i>)	1163,00	2650,00	1338,00	1068,00	3036,00
Magnésio (<i>mg</i>)	436,00	563,00	516,00	521,00	450,00
Fósforo (<i>mg</i>)	1560,00	2716,00	1830,00	1993,00	2487,00
Ferro (<i>mg</i>)	24,78	19,00	18,00	18,07	18,02
Zinco (<i>mg</i>)	15,80	20,20	20,70	18,40	15,10

Fonte: Autoria própria.

Tabela 36 – Resultados para o I2 utilizando o método lexicográfico dos dias 1 ao 3

Dia 1	Dia 2	Dia 3
Café da Manhã		
Chá de erva-doce infusão de 5% Abacaxi cru Pão de forma com glúten	Chá mate infusão de 5% Laranja pêra crua Pão de forma de aveia	Água de coco Abacaxi cru Pão de soja
Primeiro Lanche		
Queijo ricota	Queijo ricota	Queijo minas frescal
Almoço		
Suco de laranja pêra Batata inglesa cozida Soja extra solúvel em pó Agião cru Couve na manteiga crua Pintado assado	Suco de laranja valência Arroz integral cozido Feijão roxo cozido Brócolis cru Espinafre Nova Zelândia cru Carne contra-filé sem gordura grelhado	Suco de laranja baía Arroz tipo 1 cozido Ervilha em vagem Couve na manteiga crua Palmito Juçara em conserva Sardinha assada
Segundo Lanche		
Suco de laranja baía Pão de forma com glúten	Café infusão de 10% Pão de forma com glúten	Chá de erva-doce infusão de 5% Pão de forma de aveia
Jantar		
Lasanha de massa fresca cozida Ervilha em vagem Palmito Juçara em conserva Pintado assado	Arroz integral cozido Soja extra solúvel em pó Palmito Juçara em conserva Lombo de porco assado	Batata inglesa cozida Ervilha em vagem Beterraba crua Carne contra-filé sem gordura grelhado
Ceia		
Queijo petitsuisse de morango	Jambo cru	Queijo minas frescal

Fonte: Autoria própria.

Tabela 37 – Resultados para o I2 utilizando o método lexicográfico dos dias 4 e 5

Dia 4	Dia 5
Café da Manhã	
Chá mate infusão de 5%	Café infusão de 10%
Morango cru	Abacaxi cru
Curau de milho verde	Pão de soja
Primeiro Lanche	
Queijo ricota	Abacaxi cru
Almoço	
Suco de laranja da terra	Suco de laranja lima
Lasanha de massa fresca	Arroz tipo 1 cozido
Soja extra solúvel em pó	Feijão rajado cozido
Espinafre Nova Zelândia cru	Espinafre Nova Zelândia refogado
Palmito Juçara em conserva	Palmito Juçara em conserva
Pintado assado	Carne patinho sem gordura grelhado
Segundo Lanche	
Café mate infusão de 5%	Café infusão de 10%
Biscoito doce maisena	Pão de forma com glúten
Jantar	
Lasanha de massa fresca cozida	Arroz integral cozido
Feijão fradinho cozido	Lentilha cozida
Espinafre Nova Zelândia cru	Espinafre Nova Zelândia refogado
Lombo de porco assado	Carne patinho sem gordura grelhado
Ceia	
Pitanga crua	Queijo prato

Fonte: Autoria própria.

Tabela 38 – Resultado dos nutrientes para o I2 utilizando o método lexicográfico

Nutrientes	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
Calorias (<i>kcal</i>)	2100,00	2100,00	2101,00	2101,00	2100,00
Carboidratos (<i>g</i>)	237,50	237,50	237,30	237,20	237,50
Lipídeos (<i>g</i>)	53,50	57,50	59,50	62,90	63,80
Sódio (<i>mg</i>)	1721,00	1651,00	1999,00	1824,00	1999,00
Proteínas (<i>g</i>)	175,30	165,70	153,50	156,00	145,80
Fibras (<i>g</i>)	34,30	47,20	44,80	33,90	40,30
Cálcio (<i>mg</i>)	2280,00	1226,00	2112,00	1188,00	1590,00
Magnésio (<i>mg</i>)	560,00	691,00	407,00	621,00	626,00
Fósforo (<i>mg</i>)	2539,00	2103,00	1894,00	1929,00	1806,00
Ferro (<i>mg</i>)	18,35	18,08	18,07	18,02	18,04
Zinco (<i>mg</i>)	19,50	20,30	15,50	15,50	27,80

Fonte: Autoria própria.

Tabela 39 – Resultados para o I3 utilizando o método lexicográfico dos dias 1 ao 3

Dia 1	Dia 2	Dia 3
Café da Manhã		
Refrigerante de laranja Tamarindo cru Pão de forma com glúten	Refrigerante de laranja Banana da terra crua Pão de forma com glúten	Café infusão de 10% Tamarindo cru Pão de forma de aveia
Primeiro Lanche		
Queijo minas frescal	Queijo ricota	Queijo minas frescal
Almoço		
Suco de laranja baía Lasanha de massa fresca cozida Soja extra solúvel em pó Beterraba crua Palmito Juçara em conserva Pintado assado	Suco de uva concentrado envasado Arroz tipo 2 cozido Soja extra solúvel em pó Cará cozido Palmito Juçara em conserva Carne contra-filé sem gordura grelhado	Suco de tangerina Pancã Arroz tipo 1 cozido Soja extra solúvel em pó Beterraba crua Espinafre Nova Zelândia refogado Pintado assado
Segundo Lanche		
Suco de laranja baía Pão de forma com glúten	Suco de uva concentrado envasado Pão de soja	Suco de laranja lima Biscoito doce maisena
Jantar		
Lasanha de massa fresca cozida Soja extra solúvel em pó Brócolis cru Peito de frango sem pele grelhado	Arroz tipo 2 cozido Soja extra solúvel em pó Cará cozido Carne contra-filé sem gordura grelhado	Arroz tipo 1 cozido Ervilha em vagem Palmito Juçara em conserva Pintado assado
Ceia		
Queijo ricota	Queijo minas frescal	Queijo minas frescal

Fonte: Autoria própria.

Tabela 40 – Resultados para o I3 utilizando o método lexicográfico dos dias 4 e 5

Dia 4	Dia 5
Café da Manhã	
Refrigerante de limão	Refrigerante de laranja
Banana da terra crua	Banana figo crua
Bolo pronto de aipim	Biscoito doce recheado com chocolate
Primeiro Lanche	
Tamarindo cru	Queijo ricota
Almoço	
Suco de laranja baía	Suco de uva concentrado envasado
Lasanha de massa fresca cozida	Mandioca frita
Soja extra solúvel em pó	Ervilha em vagem
Couve na manteiga crua	Beterraba crua
Palmito Juçara em conserva	Palmito Juçara em conserva
Carne patinho sem gordura grelhado	Carne contra-filé sem gordura grelhado
Segundo Lanche	
Suco de laranja baía	Suco de uva concentrado envasado
Biscoito doce maisena	Pão de trigo sovado
Jantar	
Arroz integral cozido	Mandioca frita
Lentilha cozida	Soja extra solúvel em pó
Couve na manteiga crua	Beterraba crua
Carne patinho sem gordura grelhado	Lombo de porco assado
Ceia	
Pitanga prato	Queijo ricota

Fonte: Autoria própria.

Tabela 41 – Resultado dos nutrientes para o I3 utilizando o método lexicográfico

Nutrientes	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
Calorias (<i>kcal</i>)	3000,00	3001,00	3000,00	3000,00	3002,00
Carboidratos (<i>g</i>)	338,30	338,00	351,70	374,90	378,40
Lipídeos (<i>g</i>)	96,30	97,60	99,80	99,40	99,30
Sódio (<i>mg</i>)	1605,00	1830,00	1839,00	1990,00	1997,00
Proteínas (<i>g</i>)	217,40	207,90	188,00	171,00	164,30
Fibras (<i>g</i>)	38,70	35,30	44,20	39,60	39,40
Cálcio (<i>mg</i>)	2214,00	1904,00	2180,00	1854,00	1159,00
Magnésio (<i>mg</i>)	731,00	680,00	721,00	634,00	708,00
Fósforo (<i>mg</i>)	2737,00	2506,00	2275,00	2489,00	2071,00
Ferro (<i>mg</i>)	19,57	18,62	18,82	18,16	18,23
Zinco (<i>mg</i>)	21,10	27,90	18,00	31,50	21,40

Fonte: Autoria própria.

Conclusões

O propósito central desta pesquisa foi conceber e validar modelos matemáticos que facilitam a elaboração de dietas nutricionalmente adequadas, ao mesmo tempo práticas e sustentáveis para adesão contínua de indivíduos diagnosticados com essa condição crônica. Especificamente, o trabalho se dedicou ao desenvolvimento de abordagens que não só cumprissem os requisitos nutricionais impostos pela condição do diabetes, mas que também contemplassem os aspectos práticos da alimentação diária. Esta pesquisa partiu do desenvolvimento de um modelo inicial, focado exclusivamente na minimização de carboidratos, até a implementação de modelos multiobjetivos, culminando em um sistema de planejamento de refeições.

Uma das contribuições fundamentais deste trabalho foi a incorporação do custo e da variedade alimentar como objetivos secundários na otimização dietética no segundo modelo. Ao adotar uma abordagem multiobjetivo, esse modelo integra a realidade econômica e as preferências pessoais dos pacientes, dois aspectos frequentemente negligenciados em pesquisas anteriores. Outra contribuição foi o desenvolvimento de um sistema de penalidades, permitindo que as dietas fossem personalizadas para múltiplos dias sem repetição significativa de alimentos, um passo importante para evitar a monotonia dietética e aumentar a adesão ao plano nutricional.

Finalmente, adaptou-se a programação de refeições por categoria, promovendo uma distribuição equitativa de nutrientes ao longo do dia. Os modelos multiobjetivo foram, então, resolvidos a partir de duas abordagens: o método dos pesos e o método lexicográfico. As soluções não apenas atenderam a critérios nutricionais estabelecidos, como também favoreceram a variabilidade das dietas geradas, aspecto importante para a aceitação do planejamento proposto. Assim, este trabalho contribui para a literatura existente ao fornecer evidências empíricas dos benefícios de uma abordagem de otimização matemática na dietética clínica, oferecendo novas perspectivas para o manejo eficaz do diabetes através de intervenções alimentares.

Uma limitação do modelo final é a adoção de porções inteiras, de 100g ou 100ml, para todos os alimentos, o que pode não refletir com precisão as porções recomendadas ou

preferidas na prática alimentar diária. Além disso, embora o modelo multiobjetivo tenha avançado na incorporação de refeições estruturadas e variadas, o desafio de balancear carboidratos e lipídeos ainda persiste, especialmente em dias consecutivos de planejamento alimentar. Além disso, a volatilidade dos preços dos alimentos e a falta de uma base de dados dinâmica para o custo impuseram a remoção do custo como um dos objetivos na fase final do modelo, o que pode limitar a aplicabilidade em cenários onde o orçamento é uma preocupação primária para os pacientes.

Nesse sentido, pesquisas futuras podem explorar modelos mais flexíveis que permitam variações nas quantidades de alimentos, adaptando-se melhor às necessidades nutricionais individuais e às preferências alimentares. Outra área de interesse para trabalhos futuros é a inclusão da maximização de fibras como uma função objetivo dentro do modelo. Dada a importância das fibras na dieta de indivíduos com diabetes, para ajudar no controle glicêmico e promover a saciedade, modelos que priorizam a fibra dietética podem oferecer planos alimentares ainda mais alinhados com recomendações nutricionais e diretrizes clínicas.

Além disso, o desenvolvimento de uma base de dados de custos dinâmica para alimentos poderia reintegrar o custo como uma das funções objetivo do modelo final. Com isso, pode-se abordar o aspecto econômico da alimentação saudável, que é especialmente relevante em contextos de insegurança alimentar ou limitações orçamentárias. A expansão da base de dados atual para incluir uma gama mais ampla de alimentos e perfis nutricionais poderia não só aprimorar a precisão do modelo, mas também aumentar sua aplicabilidade a uma diversidade maior de contextos dietéticos e populações.

Finalmente, a implementação de técnicas de aprendizado de máquina e análise preditiva poderia ser explorada para aprimorar a personalização das dietas, permitindo que os modelos não só reajam às entradas de dados em tempo real, mas também antecipem as necessidades e preferências do usuário baseadas em padrões de consumo anteriores. Estas sugestões para trabalhos futuros têm o potencial de melhorar substancialmente o manejo dietético do diabetes e outras condições de saúde, levando a intervenções mais eficazes, personalizadas e práticas para pacientes e profissionais de saúde.

Referências

AHOURAG, A.; MOUTAOUAKIL, K. E.; CHELLAK, S.; BAIZRI, H.; CHEGGOUR, M. Multi-criteria optimization for optimal nutrition of Moroccan diabetics. In: 2022 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV). Sidi Mohamed Ben Abdellah University; Cadi Ayyad University; Faculty of Medicine e Pharmacy, Marrakech, Morocco: IEEE, mai. 2022. ISBN 978-1-6654-9558-2/22. DOI: 10.1109/iscv54655.2022.9806093. Citado 3 vezes nas páginas 19, 34.

AMERICAN DIABETES ASSOCIATION. Cardiovascular Disease and Risk Management: Standards of Medical Care in Diabetes—2020. **Diabetes Care**, American Diabetes Association, v. 43, Supplement 1, s111–s134, dez. 2019. ISSN 1935-5548. DOI: 10.2337/dc20-s010. Citado 1 vez na página 25.

_____. Standards of Medical Care in Diabetes—2018 Abridged for Primary Care Providers. **Clinical Diabetes**, American Diabetes Association, v. 36, n. 1, p. 14–37, jan. 2018. ISSN 1945-4953. DOI: 10.2337/cd17-0119. Citado 2 vezes nas páginas 19, 24.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. P. 723. ISBN 978-85-352-7161-4. Citado 5 vezes nas páginas 25, 26.

ATKINSON, M. A.; EISENBARTH, G. S.; MICHELS, A. W. Type 1 diabetes. **The Lancet**, Elsevier BV, v. 383, n. 9911, p. 69–82, jan. 2014. ISSN 0140-6736. DOI: 10.1016/s0140-6736(13)60591-7. Citado 2 vezes nas páginas 24, 25.

BAILEY, C. J.; TURNER, R. C. Metformin. **New England Journal of Medicine**, Massachusetts Medical Society, v. 334, n. 9, p. 574–579, fev. 1996. ISSN 1533-4406. DOI: 10.1056/nejm199602293340906. Citado 1 vez na página 25.

BAS, E. A robust optimization approach to diet problem with overall glycemic load as objective function. **Applied Mathematical Modelling**, Elsevier BV, v. 38, n. 19-20, p. 4926–4940, out. 2014. DOI: 10.1016/j.apm.2014.03.049. Citado 4 vezes nas páginas 19, 31, 32, 42.

BÉRUBÉ, J.-F.; GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. An exact ε -constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems: Application to the Traveling Salesman Problem with Profits. **European Journal of Operational Research**, Elsevier BV, v. 194, n. 1, p. 39–50, abr. 2009. DOI: 10.1016/j.ejor.2007.12.014. Citado 1 vez na página 32.

BOYD, S. P.; VANDENBERGHE, L. **Convex optimization**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. P. 716. ISBN 0521833787. Citado 1 vez na página 26.

BRASIL. **Guia Alimentar para a População Brasileira**. Brasília: Ministério da Saúde, 2008. P. 210. (Série A. Normas e Manuais Técnicos). Citado 1 vez na página 49.

CASTRO, R. M. F. de; SILVA, A. M. N.; SILVA, A. K. S. da; ARAÚJO, B. F. C. de; MALUF, B. V. T.; FRANCO, J. C. V. Diabetes mellitus e suas complicações: Uma revisão sistemática e informativa. **Brazilian Journal of Health Review**, Brazilian Journal of Health Review, v. 4, n. 1, p. 3349–3391, jan. 2021. ISSN 2595-6825. DOI: 10.34119/bjhrv4n1-263. Citado 4 vezes nas páginas 19, 23, 24, 37.

COLBERG, S. R.; SIGAL, R. J.; YARDLEY, J. E.; RIDDELL, M. C.; DUNSTAN, D. W.; DEMPSEY, P. C.; HORTON, E. S.; CASTORINO, K.; TATE, D. F. Physical Activity/Exercise and Diabetes: A Position Statement of the American Diabetes Association. **Diabetes Care**, American Diabetes Association, v. 39, n. 11, p. 2065–2079, out. 2016. ISSN 1935-5548. DOI: 10.2337/dc16-1728. Citado 1 vez na página 25.

COSENTINO, F.; GRANT, P. J.; ABOYANS, V.; BAILEY, C. J.; CERIELLO, A.; DELGADO, V.; FEDERICI, M.; FILIPPATOS, G.; GROBBEE, D. E.; HANSEN, T. B. et al. 2019 ESC Guidelines on diabetes, pre-diabetes, and cardiovascular diseases developed in collaboration with the EASD: The Task Force for diabetes, pre-diabetes, and cardiovascular diseases of the European Society of Cardiology (ESC) and the European Association for the Study of Diabetes (EASD). **European heart journal**, Oxford University Press, v. 41, n. 2, p. 255–323, 2020. Citado 1 vez na página 25.

DANTZIG, G. B. The Diet Problem. **Interfaces**, v. 20, n. 4, p. 43–47, ago. 1990. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/25061369>>. Citado 1 vez na página 31.

DASGUPTA, D.; NIÑO, F. **Immunological Computation: Theory and Applications**. New York, NY: Auerbach Publications, set. 2008. P. 296. ISBN 9780429134838. DOI: 10.1201/9781420065466. Citado 1 vez na página 33.

DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 6, n. 2, p. 182–197, abr. 2002. ISSN 1089-778X. DOI: 10.1109/4235.996017. Citado 2 vezes nas páginas 33, 34.

DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. Chichester: Wiley, 2001. P. 515. (Wiley-Interscience series in systems and optimization). ISBN 047187339X. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28.

DHORURI, A.; LESTARI, D.; RATNASARI, E. Menu variations for diabetes mellitus patients using Goal Programming model. In: 1. AIP Conference Proceedings. Melville, NY: AIP Publishing, ago. 2017. v. 1867, p. 020015-1–020015-12. DOI: 10.1063/1.4994418. Citado 4 vezes nas páginas 19, 32.

EGHBALI-ZARCH, M.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R.; ESFAHANIAN, F.; AZARON, A.; SEPEHRI, M. M. A New Multi-objective Optimization Model for Diet Planning of Diabetes Patients under Uncertainty. **Health Education and Health Promotion (HEHP)**, v. 5, n. 3, p. 37–55, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 32, 42.

EMMERICH, M. T. M.; DEUTZ, A. H. A tutorial on multiobjective optimization: fundamentals and evolutionary methods. **Natural Computing**, Springer Science e Business Media LLC, v. 17, n. 3, p. 585–609, mai. 2018. DOI: 10.1007/s11047-018-9685-y. Citado 2 vez na página 28.

EVERT, A. B.; DENNISON, M.; GARDNER, C. D.; GARVEY, W. T.; LAU, K. H. K.; MACLEOD, J.; MITRI, J.; PEREIRA, R. F.; RAWLINGS, K.; ROBINSON, S.; SASLOW, L.; UELMEN, S.; URBANSKI, P. B.; YANCY, W. S. Nutrition Therapy for Adults With Diabetes or Prediabetes: A Consensus Report. **Diabetes Care**, American Diabetes Association, v. 42, n. 5, p. 731–754, abr. 2019. ISSN 1935-5548. DOI: 10.2337/dci19-0014. Citado 1 vez na página 25.

FILIPPO, G. P. G.; MATEIK, S. G. S. L.; FRANZEN, A. Análise da eficácia das dietas de baixo carboidrato e cetogênica na diminuição dos marcadores de diabetes mellitus tipo 2: uma revisão sistemática. **HU Revista**, Universidade Federal de Juiz de Fora, v. 47, p. 1–16, ago. 2021. ISSN 0103-3123. DOI:

10.34019/1982-8047.2021.v47.32932. Citado 7 vezes nas páginas 19, 23, 37, 38, 84.

FOWLER, M. J. Diagnosis, Classification, and Lifestyle Treatment of Diabetes.

Clinical Diabetes, American Diabetes Association, v. 28, n. 2, p. 79–86, jan. 2010.

ISSN 1945-4953. DOI: 10.2337/diaclin.28.2.79. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24.

FUNNELL, M. M.; ANDERSON, R. M. Empowerment and Self-Management of

Diabetes. **Clinical Diabetes**, American Diabetes Association, v. 22, n. 3, p. 123–127,

jul. 2004. ISSN 1945-4953. DOI: 10.2337/diaclin.22.3.123. Citado 1 vez na

página 25.

GRAÇA, L. L. S.; JESUS, M. C. de. Desafios do manejo da contagem de carboidratos

para tratamento do diabetes tipo 1 - uma revisão de literatura. **Centro de Pesquisas**

Avançadas em Qualidade de Vida, Revista CPAQV, v. 15, V15N3, p. 1, 2023. ISSN

2178-7514. DOI: 10.36692/v15n3-20r. Citado 2 vezes nas páginas 19, 38.

HUI, L. S.; SUFAHANI, S. F.; KHALID, K.; WAHAB, M. H. A.; IDRUS, S. Z. S.;

AHMAD, A.; SUBRAMANIAM, T. S. Menu scheduling for high blood pressure patient

with optimization method through Integer Programming. **Journal of Physics:**

Conference Series, IOP Publishing, v. 1874, n. 1, p. 012088, mai. 2021. ISSN

1742-6596. DOI: 10.1088/1742-6596/1874/1/012088. Citado 1 vez na página 35.

INTERNATIONAL DIABETES FEDERATION. **IDF Diabetes Atlas**. Brussels,

Belgium, 2021. Disponível em:

<<https://diabetesatlas.org/atlas/tenth-edition/>>. Citado 3 vezes nas

páginas 19, 23.

ISERMANN, H. Linear lexicographic optimization. **Operations Research Spektrum**,

Springer Science e Business Media LLC, v. 4, n. 4, p. 223–228, dez. 1982. ISSN

1436-6304. DOI: 10.1007/bf01782758. Citado 3 vez na página 28.

JIMÉNEZ, M. Ranking fuzzy numbers through the comparison of its expected intervals.

International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based

Systems, World Scientific Pub Co Pte Lt, v. 04, n. 04, p. 379–388, ago. 1996. DOI:

10.1142/s0218488596000226. Citado 1 vez na página 32.

JONES, D.; TAMIZ, M. **Practical Goal Programming**. New York, NY: Springer US, 2010. v. 141, p. 184. (International Series in Operations Research & Management Science). ISBN 9781441957719. DOI: 10.1007/978-1-4419-5771-9. Citado 1 vez na página 32.

LOUZADA, M. L. C.; COSTA, C. S.; SOUZA, T. N.; CRUZ, G. L. da; LEVY, R. B.; MONTEIRO, C. A. Impacto do consumo de alimentos ultraprocessados na saúde de crianças, adolescentes e adultos: revisão de escopo. **Cadernos de Saúde Pública**, FapUNIFESP (SciELO), v. 37, n. 1, p. 1–48, 2021. ISSN 0102-311X. DOI: 10.1590/0102-311x00323020. Citado 1 vez na página 19.

LUENBERGER, D. G.; YE, Y. **Linear and Nonlinear Programming**. 4. ed. Berlin: Springer, 2008. P. 546. (International Series in Operations Research & Management Science). ISBN 9780387745039. Citado 3 vez na página 26.

MACAMBIRA, A. F. U.; SIMONETTI, L.; RODRIGUES, R. F.; MACULAN, N. (Ed.). **Tópicos em Otimização Inteira**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2023. P. 258. ISBN 9788571084919. Citado 2 vez na página 26.

MAILLOT, M.; DARMON, N.; DREWNOWSKI, A. Are the lowest-cost healthful food plans culturally and socially acceptable? **Public Health Nutrition**, Cambridge University Press (CUP), v. 13, n. 8, p. 1178–1185, jan. 2010. ISSN 1475-2727. DOI: 10.1017/s1368980009993028. Citado 1 vez na página 34.

MARLER, R. T.; ARORA, J. S. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, Springer Science e Business Media LLC, v. 26, n. 6, p. 369–395, abr. 2004. DOI: 10.1007/s00158-003-0368-6. Citado 8 vezes nas páginas 27–29.

MCCANN-RUGG, M.; WHITE, G. P.; ENDRES, J. M. Using goal programming to improve the calculation of diabetic diets. **Computers & Operations Research**, Elsevier BV, v. 10, n. 4, p. 365–373, jan. 1983. ISSN 0305-0548. DOI: 10.1016/0305-0548(83)90011-4. Citado 2 vez na página 31.

PAIDIPATI, K. K.; KOMARAGIRI, H.; CHESNEAU, C. Pre-Emptive and Non-Pre-Emptive Goal Programming Problems for Optimal Menu Planning in Diet Management of Indian Diabetes Mellitus Patients. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, MDPI AG, Department of Statistics, Lady Shri Ram College for Women, University of Delhi, New Delhi 110024, India, v. 18,

n. 7842, p. 1–12, jul. 2021. ISSN 1660-4601. DOI: 10.3390/ijerph18157842. Citado 3 vezes na página 34.

PAULINO, J. C. P. L. **Modelagem matemática para otimização de dietas de portadores de Diabetes Mellitus**. 2017. F. 88. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional de Conhecimento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/2375>>. Citado 5 vezes nas páginas 20, 33, 35, 37, 48.

PRILIANTI, K. R.; CALLISTA, P. B.; SETIAWAN, H. Artificial immune system for diabetes meal plans optimization. In: AIP Conference Proceedings. Melville, NY: AIP Publishing, 2017. v. 1825, p. 020017-1–020017-8. DOI: 10.1063/1.4978986. Citado 1 vez na página 33.

SAPRI, N. S. M.; BEDI, M. R.; ABDUL-RAHMAN, S.; BENJAMIN, A. M. A diet recommendation for diabetic patients using integer programming. In: AIP Conference Proceedings. Melville, NY: AIP Publishing, 2019. v. 2138, p. 040022-1–040022-6. DOI: 10.1063/1.5121101. Citado 1 vez na página 33.

SHERALI, H. D.; SOYSTER, A. L. Preemptive and nonpreemptive multi-objective programming: Relationship and counterexamples. **Journal of Optimization Theory and Applications**, Springer Science e Business Media LLC, v. 39, n. 2, p. 173–186, fev. 1983. ISSN 1573-2878. DOI: 10.1007/bf00934527. Citado 1 vez na página 28.

SILVA, A. D. da; MATOS JÚNIOR, N.; DAMASCENO, D. D.; GUIMARÃES, N. S.; GOMES, J. M. G. Estado nutricional, fatores de risco e comorbidades em adultos portadores de diabetes mellitus tipo 2. **HU Revista**, Universidade Federal de Juiz de Fora, v. 46, p. 1–9, mai. 2020. ISSN 0103-3123. DOI: 10.34019/1982-8047.2020.v46.28790. Citado 2 vezes nas páginas 19, 37.

SILVA, D. F.; SOARES, T. F.; GABRIEL, P. H. R. Programação inteira aplicada à otimização de dietas para portadores de diabetes mellitus. In: ANAIS do Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Campinas: Galoá, 2020. P. 12. Citado 3 vezes nas páginas 20, 41, 49.

SILVA, J. G. R.; BERNARDINO, H. S.; BARBOSA, H. J. C.; CARVALHO, I. A. de; FONSECA VIEIRA, V. da; LOUREIRO, M. M. S.; XAVIER, C. R. Solving a Multiobjective Caloric-Restricted Diet Problem using Differential Evolution. In: 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). New York, NY: IEEE, jun. 2017.

P. 2062–2069. DOI: 10.1109/cec.2017.7969554. Citado 7 vezes nas páginas 35, 47, 72, 73.

SILVA, J. G. R.; BARBOSA, H. J. C.; CARVALHO, I. A.; VIEIRA, V. F.; XAVIER, C. R. Um estudo comparativo entre um algoritmo genético e um algoritmo de evolução diferencial para o problema da dieta restrita em calorias. In: ANAIS do Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Rio de Janeiro, RJ: SOBRAPO, 2017. P. 2278–2288. Citado 11 vezes nas páginas 35, 44, 45, 47, 73–75.

SLADEK, R.; ROCHELEAU, G.; RUNG, J.; DINA, C.; SHEN, L.; SERRE, D.; BOUTIN, P.; VINCENT, D.; BELISLE, A.; HADJADJ, S.; BALKAU, B.; HEUDE, B.; CHARPENTIER, G.; HUDSON, T. J.; MONTPETIT, A.; PSHEZHETSKY, A. V.; PRENTKI, M.; POSNER, B. I.; BALDING, D. J.; MEYRE, D.; POLYCHRONAKOS, C.; FROGUEL, P. A genome-wide association study identifies novel risk loci for type 2 diabetes. **Nature**, Springer Science e Business Media LLC, v. 445, n. 7130, p. 881–885, fev. 2007. ISSN 1476-4687. DOI: 10.1038/nature05616. Citado 1 vez na página 24.

SOARES, T. F.; GABRIEL, P. H. R.; ESCARPINATI, M. C. Modelos de otimização multiobjetivo para o planejamento de dietas de portadores de diabetes. In: ANAIS do Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Campinas: Galoá, 2023. P. 1. Citado 1 vez na página 51.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE DIABETES. **Manual de Nutrição Pessoas com Diabetes**. São Paulo, SP, 2009. Disponível em: <<https://diabetes.org.br/e-book/manual-de-nutricao-pessoas-com-diabetes/>>. Citado 1 vezes nas páginas 38, 39.

STIGLER, G. J. The Cost of Subsistence. **Journal of Farm Economics**, Oxford University Press (OUP), v. 27, n. 2, p. 303, mai. 1945. DOI: 10.2307/1231810. Citado 1 vez na página 31.

SUN, Y.; WANG, G. Applications of MOGA in nutritional diet for diabetic patients. In: 2009 IEEE International Symposium on IT in Medicine & Education. Zhengzhou, China: IEEE, ago. 2009. P. 250. DOI: 10.1109/itime.2009.5236421. Citado 1 vez na página 33.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos**. São Paulo, SP: USP, 2020. Disponível em: <<http://www.fcf.usp.br/tbca>>. Citado 1 vez na página 47.

XAVIER, C. R.; SILVA, J. G. R.; DUARTE, G. R.; CARVALHO, I. A.; VIEIRA, V. F.; GOLIATT, L. An island-based hybrid evolutionary algorithm for caloric-restricted diets. **Evolutionary Intelligence**, Springer Science e Business Media LLC, v. 16, n. 2, p. 553–564, abr. 2023. ISSN 1864-5917. DOI: 10.1007/s12065-021-00680-0. Citado 5 vezes nas páginas 31, 35, 44, 45.

ZIMMET, P.; ALBERTI, K. G. M. M.; SHAW, J. Global and societal implications of the diabetes epidemic. **Nature**, Springer Science e Business Media LLC, v. 414, n. 6865, p. 782–787, dez. 2001. ISSN 1476-4687. DOI: 10.1038/414782a. Citado 1 vez na página 24.