

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

VÍTOR DE OLIVEIRA POCHMANN

**SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO MULTIOBJETIVO PARA DIETAS
ALIMENTARES**

CAMPINAS

2022

VÍTOR DE OLIVEIRA POCHMANN

**SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO MULTIOBJETIVO PARA DIETAS
ALIMENTARES**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Fernando José Von Zuben

Este trabalho corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Vítor de Oliveira Pochmann, orientada pelo Prof. Dr. Fernando José Von Zuben.

CAMPINAS

2022

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

P75s Pochmann, Vítor de Oliveira, 1995-
Sistema de recomendação multiobjetivo para dietas alimentares /
Vítor de Oliveira Pochmann. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Fernando José Von Zuben.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
1. Dieta. 2. Otimização multiobjetivo. 3. Programação matemática.
4. Algoritmos. I. Von Zuben, Fernando José, 1968-. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Multi-objective recommendation system for food diets

Palavras-chave em inglês:

Diet

Multi-objective optimization

Mathematical programming

Algorithm

Área de concentração: Engenharia de Computação

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Fernando José Von Zuben [Orientador]

Guilherme Palermo Coelho

Christiano Lyra Filho

Data de defesa: 04-03-2022

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-1042-9591>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/1794510506026668>

COMISSÃO JULGADORA – DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato: Vítor de Oliveira Pochmann

RA: 264438

Data da defesa: 4 de Março de 2022

Título da Tese: “Sistema de Recomendação Multiobjetivo para Dietas Alimentares”

Prof. Dr. Fernando José Von Zuben (FEEC/Unicamp) (Presidente)

Prof. Dr. Guilherme Palermo Coelho (FT/Unicamp) (Membro Titular Externo)

Prof. Dr. Christiano Lyra Filho (FEEC/Unicamp) (Membro Titular Interno)

A Ata de Defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Fernando J. Von Zuben, que promoveu a oportunidade de desenvolver esta pesquisa de mestrado e esteve sempre presente, particularmente em momentos decisivos do desenvolvimento do plano de trabalho. O seu modo de agir nos âmbitos profissional e acadêmico foram importantes guias para a minha formação de pós-graduação.

Agradeço à minha família por todo o suporte ao longo desta jornada, que foi trilhada em pleno período da pandemia de Covid-19. Um agradecimento especial aos meus pais, Marcio Pochmann e Deise de Oliveira Pochmann, que me deram todo o apoio para eu realizar este trabalho em uma época difícil e deprimente.

Agradeço à Profa. Dra. Cinthia Baú Betim Cazarin, da Faculdade de Engenharia de Alimentos, que ajudou na busca de informações sobre alimentos, conteúdos cruciais para o fluxo de informação do projeto; e ao Prof. Dr. Marcos Medeiros Raimundo (UFRJ), que ajudou na solução de problemas técnicos ao se buscar um uso personalizado da ferramenta Gurobi.

Agradeço à aluna de iniciação científica Esteffany Menezes Ferreira por ter dado os primeiros passos no desenvolvimento de um sistema de recomendação multiobjetivo para dietas alimentares, o que permitiu a continuidade e o avanço desta pesquisa, desta vez em nível de pós-graduação.

Cabe um agradecimento especial ao professor Cláudio Leonardo Lucchesi, que me ajudou na decisão de cursar o mestrado na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp).

Agradeço à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Unicamp, pelo apoio institucional e de infraestrutura para cursar o mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Processo nº 88887.601672/2021-00, Programa PROEX (Programa de Excelência Acadêmica).

Finalmente, agradeço à sociedade brasileira, que encara tempos desafiadores e segue a Constituição de 1988, sustentando a educação pública e permitindo que eu experimentasse esse período de pós-graduação na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp).

RESUMO

Este trabalho está voltado ao desenvolvimento de um sistema de recomendação personalizado para dietas alimentares, que procura sugerir ao usuário um elenco diverso de quatro refeições diárias (café da manhã, almoço, lanche e jantar) capazes de atender simultaneamente um elenco de especificações nutricionais definidas por especialistas e também otimizar múltiplos objetivos conflitantes associados à dieta alimentar. Embora outros objetivos possam ser considerados, o conflito aqui se dá entre respeitar uma proposta de distribuição de energia e quantidade de alimentos entre as refeições e minimizar o custo total de aquisição e preparo, o que leva a várias soluções de compromisso que aproximam a fronteira de Pareto, a qual contém todas as soluções eficientes do problema. As soluções eficientes são buscadas a partir do emprego conjunto dos pacotes de otimização *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) e Gurobi, após formular o problema da dieta como de otimização binível: um problema combinatório e multiobjetivo no nível superior – quais alimentos de cada categoria (as categorias de alimentos disponíveis e as categorias alocadas a cada uma das quatro refeições são definidas previamente) devem compor a dieta – e um problema de programação matemática no nível inferior – qual a quantidade ótima dos alimentos selecionados para compor a dieta, respeitando as restrições nutricionais impostas pelo especialista, de forma personalizada. O NSGA-II resolve o problema combinatório sob uma perspectiva multiobjetivo, ao evoluir soluções candidatas que especificam quais alimentos compõem as quatro refeições diárias. A avaliação de cada proposta de solução candidata fornecida pelo NSGA-II é realizada após a obtenção da quantidade ótima de cada alimento na proposta, utilizando o Gurobi. Esta definição por parte do Gurobi deve levar em conta todas as restrições associadas à dieta e uma tabela com a composição nutricional e calórica individual de cada alimento, ambas fornecidas pelo usuário ao Gurobi. Como o Gurobi não opera diretamente com uma perspectiva de otimização multiobjetivo, a sua função-objetivo envolve maximizar o total de energia da dieta diária. Resultados experimentais, considerando custos fictícios para os alimentos, mostram que NSGA-II e Gurobi operam em sinergia, fornecendo um elenco diverso de cardápios para as quatro refeições diárias, realizando assim uma boa aproximação da fronteira de Pareto. O

diferencial desta solução multiobjetivo para o problema da dieta, então, está no fornecimento de soluções candidatas diversas e, ao mesmo tempo, eficientes (no sentido de aproximarem a fronteira de Pareto e se distribuírem ao longo de sua extensão), após um balanço otimizado entre o que a dieta alimentar específica e o que os alimentos selecionados oferecem.

Palavras-chave: dieta alimentar, otimização binível, otimização multiobjetivo, programação matemática, diversidade de cardápios eficientes.

ABSTRACT

This work is aimed at developing a personalized recommendation system for food diets, which seeks to suggest to the user a diverse list of four meals a day (breakfast, lunch, snack, dinner) capable of simultaneously meeting a list of nutritional specifications defined by experts and also optimizing multiple conflicting goals associated with diet. Although other objectives can be considered, the conflict here is between following a proposal for the distribution of energy and quantity of food among the meals, and minimizing the total cost of acquisition and preparation, which leads to several trade-offs that approach the Pareto frontier, which contains all efficient solutions to the problem. Efficient solutions are sought from the joint use of the *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) and Gurobi optimization packages, after formulating the diet problem as a bilevel optimization: a combinatorial and multi-objective problem at the top level – which foods from each category (the available food categories and the categories allocated to each of the four meals are defined in advance) should make up the diet – and a mathematical programming problem at the lower level – what is the optimal amount of the selected foods to compose the diet, respecting the nutritional restrictions imposed by the expert, in a personalized way. The NSGA-II solves the combinatorial problem from a multi-objective perspective, by evolving candidate solutions that specify which foods make up the four daily meals. The evaluation of each proposal for candidate solution provided by the NSGA-II is carried out after obtaining the optimal amount of each food in the proposal, using Gurobi. This definition by the Gurobi must take into account all restrictions associated with the diet and a table with the individual nutritional and caloric composition of each food, both provided by the user to the Gurobi. As Gurobi does not operate directly with a multi-objective optimization perspective, its objective function involves maximizing the total energy of the daily diet. Experimental results, considering fictitious food costs, show that NSGA-II and Gurobi operate in synergy, providing a diverse list of menus for the four daily meals, thus making a good approximation of the Pareto frontier. The distinctive aspect of this multi-objective solution to the diet problem, then, lies in the supply of diverse and, at the same time, efficient candidate solutions (in the sense of approaching the Pareto frontier and being scattered along its extension), after an optimized balance between what the diet specifies and what the selected foods offer.

Keywords: food diet, bilevel optimization, multi-objective optimization, mathematical programming, diversity of efficient menus.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Histórico de Obesidade, Problema Alimentar e Crescimento da População entre 1975 e 2018, no Brasil.	14
Figura 2	Exemplos de fronteira de Pareto, evidenciando soluções dominadas (em cinza) e não-dominadas (em vermelho), para cenários de maximização e de minimização dos objetivos.	25
Figura 3	Diagrama descrevendo os passos de um algoritmo evolutivo.	28
Figura 4	Imagem de parte da tabela de cereais, uma das 15 categorias presentes no banco de dados relacional SQLite3.	37
Figura 5	Imagem da tabela de restrições, uma das 2 tabelas de restrições presente no banco de dados relacional SQLite3.	37
Figura 6	Fluxo de informação adotado pelo sistema de recomendação de dietas alimentares, formulado como um problema de otimização binível.	40
Figura 7	Módulos constituintes do sistema de otimização multiobjetivo para dietas alimentares, formulado como um problema de otimização binível.	41
Figura 8	Fluxo de informação do sistema de recomendação multiobjetivo para dieta alimentar.	42
Figura 9	Comportamento do termo peso, que é uma função linear por partes, penalizando a nota para casos em que o peso total dos alimentos consumidos ao longo das quatro refeições fica abaixo de 900 g e acima de 2100 g.	52
Figura 10	Processo evolutivo multiobjetivo do NSGA-II.	55
Figura 11	Espaço de objetivos (Custo X Concentração) com as soluções candidatas do Problema da Dieta Alimentar (quanto menor os valores dos objetivos, melhor).	61
Figura 12	Espaço de objetivos (Custo X Concentração) com as soluções candidatas do Problema da Dieta Alimentar, mas desta vez impondo um filtro com alimentos fixos (quanto menor os valores dos objetivos, melhor).	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição dos nutrientes do alimento Arroz Integral Cozido, a cada 100 gramas.	31
Tabela 2	Escopo de informações da TACO4.	34
Tabela 3	Escopo de informações da Tabela de Restrição de Nutrientes.	36
Tabela 4	Estrutura do vetor de tamanho fixo que representa uma solução candidata.	46
Tabela 5	Composição da estrutura do Café da Manhã.	47
Tabela 6	Condições de referência para a distribuição de energia adquirida e quantidade de alimentos consumida ao longo das quatro refeições diárias.	48
Tabela 7	Exemplo de resultado do Gurobi.	55
Tabela 8	Composição da dieta em categorias de alimentos.	58
Tabela 9	Evolução das Soluções Candidatas ao longo de 10 gerações.	59
Tabela 10	Objetivos das quatro soluções candidatas destacadas na Figura 11.	62
Tabela 11	Soluções candidatas destacadas na Figura 11.	62
Tabela 12	Apresentação da Solução Candidata filtrada pelo usuário, com 12 categorias (C1 a C12), mas em que há dois alimentos pré-selecionados.	66
Tabela 13	Objetivos das quatro soluções candidatas destacadas na Figura 12.	66
Tabela 14	Soluções candidatas destacadas na Figura 12, considerando dois alimentos fixos.	67

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Motivação e objetivos	13
1.2. Escopo e metodologia da pesquisa	15
1.3. Organização do texto	19
2. PRINCIPAIS CONCEITOS E REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1. Dieta Alimentar	20
2.2. Programação Matemática Linear	21
2.4. Problemas de otimização multiobjetivo	23
2.5. Problemas de otimização binível	26
2.6. Algoritmos evolutivos	27
2.7. Tabelas dos Alimentos	30
3. METODOLOGIA	32
3.1. Introdução	32
3.2. Procedimentos computacionais	33
3.3. Base de Dados	34
3.4. Imputação de dados faltantes	38
3.5. Fluxo de Informação	39
3.7. Caracterização de uma solução candidata	45
3.8. Especificação detalhada dos objetivos do NSGA-II	47
3.9. Papel desempenhado pelo NSGA-II e pelo Gurobi	53
4. RESULTADOS E ANÁLISES	57
4.1. Resultados experimentais sem alimentos fixos	57
4.2. Resultados experimentais com alimentos fixos	65
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
REFERÊNCIAS	73
ANEXOS	78
Anexo 1. Tabela TACO4 - Categoria Cereais	78
Anexo 2. Tabelas de Recomendações Diárias	83
Anexo 3. Publicação vinculada a esta pesquisa	87

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e objetivos

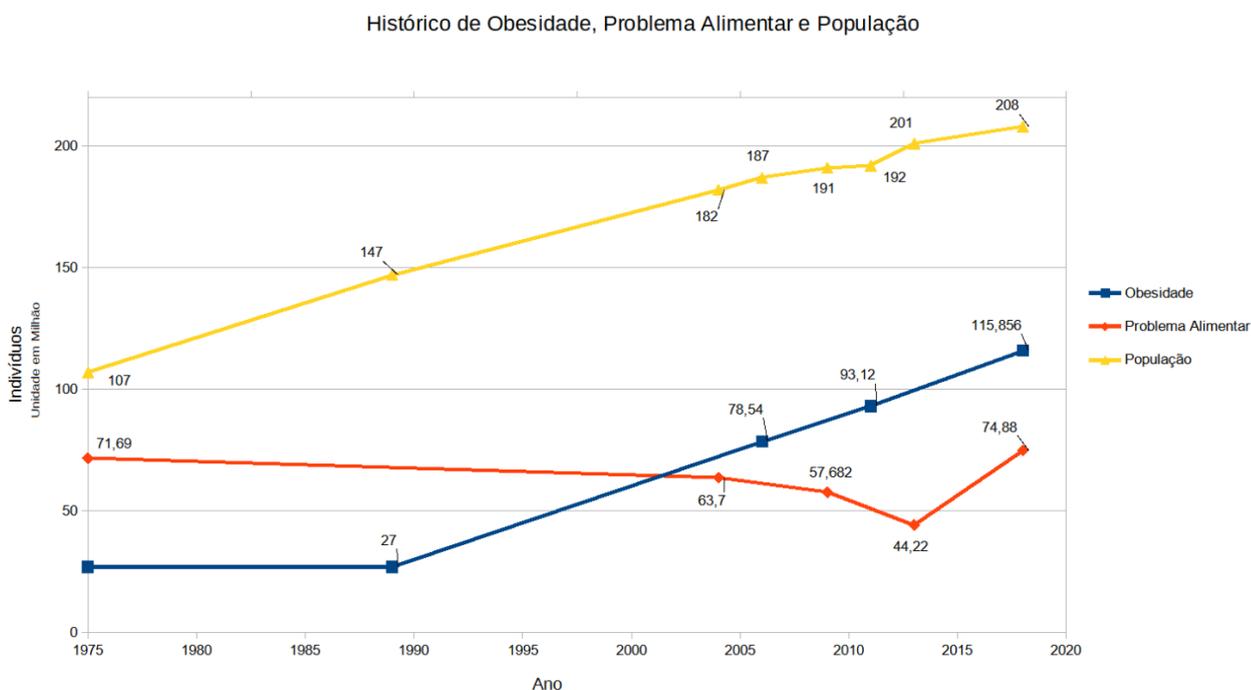
Com o passar dos anos, o Brasil sofreu um intenso processo de industrialização e urbanização, com impactos positivos na qualidade de vida de sua população e com maior disponibilidade e variedade de alimentos industrializados. Os planos governamentais e as expansões tecnológicas e industriais permitiram reduzir os problemas de segurança alimentar da população brasileira, promovendo um aumento de disponibilidade e variedade de alimentos naturais e industrializados. Com isso, houve uma redução da subnutrição na população brasileira, mas se verificou uma tendência de aumento nos casos de obesidade na população, em todas as faixas etárias e classes sociais, se configurando como um problema de saúde pública, também verificado em outros países (WHO, 2021). Conforme ilustrado na Figura 1, mais de 50% da população brasileira sofre de algum grau de obesidade e mais de 30% da população apresenta o problema de dieta alimentar, caracterizado pelo não atendimento do consumo necessário e saudável de alimentos por um indivíduo (insegurança alimentar) (IBGE, 2021).

O pesquisador Josué de Castro, em seu livro “A Geografia da Fome”, de 1946, fez o primeiro mapa da fome no Brasil, registrando os principais hábitos alimentares de cada região do país (CASTRO, 1984) (VASCONCELOS, 2008) (SÁ, 2011). Havia um quadro de insegurança alimentar, pois o autor revelou que a maioria da população consumia um valor inferior ao mínimo de calorias desejada¹ e abriu as portas para estudos mais aprofundados acerca da segurança alimentar em nossa sociedade e outras questões relacionadas.

Na medida em que subnutrição e obesidade são consideradas problemas alimentares, uma das formas efetivas para combatê-las é realizar uma alimentação saudável, por exemplo, suportada por dietas alimentares especificadas por especialistas, seja individualmente, seja para classes de indivíduos com sintomas, hábitos e metabolismos similares.

¹ Um dos estudos de Castro envolveu as famílias operárias em Recife (PE) que tinham uma dieta à base de açúcar, café, charque, farinha, feijão e pão, agregando em torno de 1645 calorias por dia, o que não alcançava o requisito mínimo de consumo nos estudos de saúde alimentar, com valor de 2000 calorias (CASTRO, 1984) (MS, 2004) (ANVISA, 2005) (VASCONCELOS, 2008).

De fato, seguir uma alimentação saudável é um desafio diário, individual e que requer ajustes ao longo da vida, pelas variações metabólicas naturais do organismo e pelas inevitáveis mudanças de hábitos, com impacto na demanda por calorias e nutrientes e em outras necessidades efetivas por parte do organismo (CEDERHOLM et al., 2017). Portanto, mesmo indivíduos com propósitos de vida bem definidos podem desenvolver maus hábitos alimentares, seja porque o cérebro nem sempre consegue realizar avaliações confiáveis de relações de custo / benefício associadas ao consumo de alimentos, seja porque a decisão a ser tomada envolve cenários complexos, com muitas variáveis de decisão que operam de forma inter-relacionada (EVERT et al., 2019).



Fonte: IBGE; Ministério da Saúde. Elaboração própria.

Figura 1. Histórico de Obesidade, Problema Alimentar e Crescimento da População entre 1975 e 2018, no Brasil.

Com o desenvolvimento acentuado de técnicas de inteligência artificial, é possível contar com o apoio de aplicativos capazes de realizar conjuntamente processamento de informação e otimização, ao cruzar especificações de dietas alimentares com o que é oferecido de calorias e nutrientes pelos alimentos candidatos a comporem a dieta, informações essas bem consolidadas na literatura.

Vários serviços e aplicativos oferecem guias de dietas com métodos de otimização para ajudar os usuários a seguirem dietas saudáveis: aplicativos como *MyFitnessPal*², sites como *Perfectbody.me*³ e programas como *NutriGenie*⁴. Esses são exemplos de que a proposição e a síntese de sistemas de recomendação personalizados, voltados para dietas alimentares, são viáveis. No entanto, a natureza combinatória, multiobjetivo e binível do problema da dieta geralmente não é explorado diretamente e menos ainda conjuntamente, sendo este o principal objetivo deste trabalho, visando assim a concepção de sistemas de recomendação ainda mais eficientes.

1.2. Escopo e metodologia da pesquisa

Há muitas iniciativas na literatura visando formular e resolver o problema da dieta, ao longo das últimas décadas (DOOREN, 2018). São muitas decisões de projeto envolvidas, o que cria diferenças de formulação e de abordagem, muitas vezes dificultando a realização de comparações sistemáticas. Não pretendemos aqui fazer um apanhado geral das melhores práticas, mas nos comprometemos a conceber um produto, mesmo que ainda conceitual, com boa perspectiva de atendimento de demandas práticas contemporâneas.

As seguintes propriedades e características do problema da dieta são enfatizadas neste trabalho:

1. É inerentemente um problema de otimização com restrições, que pode ser resolvido no domínio da programação matemática.
2. É inerentemente um problema com múltiplos objetivos conflitantes a serem atendidos simultaneamente.

² O serviço da *MyFitnessPal, Inc*, registra as refeições e dietas do usuário, além de fazer metas para o emagrecimento. (MYFITNESSPAL, 2022).

³ Serviço que cria um plano de refeições de acordo com as respostas do usuário de um questionário, além de registrar o consumo do usuário (UAB, 2022).

⁴ Software desenvolvido pelo grupo de pesquisadores da Universidade de Stanford, oferece um programa de nutrição (NUTRIGENIE, 2022).

3. Mesmo em diferentes configurações, com diferentes restrições e objetivos envolvidos, o problema da dieta envolve uma explosão combinatória de possibilidades de composição de alimentos.
4. Além de sua natureza combinatória, o inter-relacionamento entre as especificações nutricionais e calóricas da dieta e o que os alimentos oferecem individualmente é bastante intrincado, o que justifica a adoção de uma formulação de otimização binível para o problema da dieta.
5. A aderência de um paciente a uma dieta tende a ser tão mais provável quanto mais diversas forem as possibilidades de cardápios ao longo dos dias.
6. Com a evolução tecnológica e um acesso mais fácil à informação, as expectativas dos usuários de sistemas de recomendação se tornam multifacetadas e mais exigentes, demandando soluções personalizadas, capazes de otimizar múltiplos objetivos conflitantes simultaneamente e concebidas para considerar a maior quantidade possível de informação pertinente.

Após a imposição de algumas condições de contorno, este trabalho buscou uma formulação do problema da dieta e uma estratégia de solução que respondesse coerentemente a esses seis atributos do problema da dieta, o que torna a proposta aqui apresentada única e com diferenciais decisivos perante iniciativas afins na literatura (DOOREN, 2018), particularmente na exploração da natureza multiobjetivo do problema, na sua formulação binível e na forma como o problema de otimização resultante foi resolvido computacionalmente, ao recorrer às técnicas de otimizações de alto desempenho e que precisam operar em sinergia.

As condições de contorno foram as seguintes:

1. Para suportar parte das restrições do problema da dieta e especificar a composição nutricional e calórica dos alimentos candidatos a estarem presentes em uma dieta, são utilizadas a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos Versão 4 - TACO4 (NEPA, 2006), as tabelas de Recomendação Diária e Restrições Adequadas (National Institutes of Health, 2011) e as tabelas de Canada Dietary Reference Intakes (2010).

2. Sem perda de generalidade, considerou-se o foco em uma pessoa adulta (de 18 a 35 anos). As categorias de alimentos seguiram a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos Versão 4 (TACO4), e incluem açucarados (açúcar e doces), bebidas (sucos e refrigerantes), carnes (bovinos, suínos e aves), cereais (arroz, pão e farinha), frutas, gorduras (azeites, óleos e manteigas), industrializados (azeitona, maionese e leite de coco), leguminosas (feijão, soja e amendoim), leites (iogurtes, leites e queijos), miscelâneas (cafés, sal e fermentos), nozes (castanha-de-caju, pinhão e noz), ovos, pescados, preparados (bife à cavalo, feijoadas e estrogonofes) e verduras (abóboras, alfaces e cenouras).
3. A especificação da dieta é para 24 horas. Foram definidas quatro refeições diárias, envolvendo café da manhã, almoço, lanche e jantar, sendo que foi especificada, para cada uma dessas refeições, a presença de categorias específicas de alimentos, formando um vetor de tamanho fixo capaz de indicar os alimentos presentes em uma dieta diária, a serem selecionados dentro de suas categorias específicas.
4. No nível superior do problema de otimização binível, foram definidos dois objetivos conflitantes a serem simultaneamente otimizados, um envolvendo o atendimento de um padrão de distribuição de energia adquirida e quantidade de alimentos ao longo das refeições e outro envolvendo o custo total de aquisição e preparo das quatro refeições diárias.
5. O custo de aquisição e preparo de cada alimento foi definido de forma arbitrária e aleatória, pois não foram encontrados dados totalmente consistentes na literatura. Esta decisão, obviamente, impede que as soluções encontradas nas análises experimentais correspondam a um cenário real de custo de aquisição e preparo, tendo o papel apenas de validar a técnica em si.
6. No nível inferior do problema de otimização binível, o objetivo é maximizar a energia total.

A metodologia então fica bem caracterizada, ao interpretar o problema da dieta como um problema de otimização binível (LIU; GAO; ZHANG; MENG; 2015) (SINHA et al., 2018), com uma etapa de nível superior que se configura como um problema de otimização combinatória multi-objetivo, cujas soluções candidatas são avaliadas, uma a uma, após se resolver um problema de programação matemática no nível inferior. A primeira otimização adotada para se resolver o problema do nível superior foi o algoritmo *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) (DEB; PRATAP; AGARWAL; MEYRIVAN, 2002), motivado pela forma explícita com que as soluções são classificadas de acordo com o conceito de dominância e pela forma eficaz com que as soluções candidatas se espalham ao longo da fronteira de Pareto, a partir do conceito de *crowding distance*. Já a otimização para o problema do nível inferior é uma otimização linear mono-objetivo, utilizando a biblioteca Gurobi (GUROBI, 2021), um dos mais populares e bem-sucedidos *toolboxes* de programação matemática para a solução de problemas de otimização com restrições.

As soluções candidatas são compostas então por um conjunto de alimentos distribuídos ao longo das quatro refeições diárias, cada alimento selecionado dentro das categorias de alimentos que compõem cada refeição, assim como as suas respectivas quantidades. A partir da especificação de cada solução candidata, é possível avaliar as duas funções-objetivo consideradas, guiando assim a operação do NSGA-II, o qual vai promover uma aproximação da fronteira de Pareto, com soluções candidatas que se distribuem ao longo de sua extensão, sugerindo ao usuário múltiplos compromissos entre os dois objetivos conflitantes. Essa aproximação da fronteira de Pareto é composta, portanto, por soluções não-dominadas e diversas para o problema da dieta.

1.3. Organização do texto

Além deste capítulo introdutório, o texto contém outros quatro capítulos. O Capítulo 2 aborda os principais conceitos que fundamentam a pesquisa, incluindo um posicionamento perante a literatura. O Capítulo 3 descreve a metodologia da pesquisa, incluindo fluxos de informação, estrutura de dados e funcionalidades do sistema de recomendação para dietas alimentares. O Capítulo 4 é dedicado a análises experimentais, incluindo casos de estudo simulados, com diferentes quantidades de variáveis de decisão. Os resultados experimentais indicam que a aplicação conjunta de duas técnicas para resolver o problema de otimização multiobjetivo binível é viável e escalável, conduzindo a boas aproximações da fronteira de Pareto. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais e perspectivas futuras da pesquisa.

2. PRINCIPAIS CONCEITOS E REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo aborda os principais conceitos envolvidos na pesquisa e apresenta a formulação matemática do problema da dieta.

2.1. Dieta Alimentar

Dietas alimentares envolvem ao menos um objetivo a ser alcançado e variadas restrições a serem atendidas. O não atendimento de uma ou mais restrições por parte de uma solução candidata torna esta solução infactível. Portanto, a formulação matemática de problemas de dieta alimentar envolve programação matemática, capaz de buscar uma solução factível que otimiza o único objetivo ou que estabelece um compromisso ótimo entre múltiplos objetivos conflitantes.

Uma das primeiras formulações matemáticas de problemas de dieta alimentar ocorreu na metade do século XX, durante a Segunda Guerra Mundial e, posteriormente, durante a Guerra Fria. As forças armadas estadunidenses queriam entregar alimentos para os soldados com o menor custo possível e maximizando o desempenho da tropa (DOOREN, 2018) (BARBOSA, 2014). Os primeiros aplicadores foram o economista George Stigler e o matemático George Dantzig, que implementaram modelos lineares para atingir esses objetivos.

George Stigler conseguiu encontrar uma solução aproximada, enquanto Dantzig, após formular o algoritmo Simplex em 1947, encontrou a solução ótima para este problema (DOOREN, 2018) (BARBOSA, 2014) (GASS; HARRIS, 2001), com base na formulação matemática concebida à época. Além disso, a Programação Linear era frequentemente empregada na especificação de alimentos para rações de animais em empreendimentos do agronegócio (SKLAN; DARIEL; 1992) (GASS; HARRIS, 2001).

Graças a esses primeiros estudos, abriu-se a oportunidade de explorar este cenário da dieta alimentar. Novos aspectos do problema foram levantados, incluindo questões de sustentabilidade, produtividade e saúde (AMIN; GOW-MULLIGAN; GUOQING, 2019). Formulações mais elaboradas para o problema da dieta foram seguidas pela proposição de técnicas de solução mais avançadas, contribuindo assim para um expressivo avanço da área (SANTOS; SICHIERI; DARMON et al., 2018) (VIEUX; MAILLOT; DREWNOWSKI, 2019), sendo que a técnica de solução

mais utilizada é a programação matemática linear (DOOREN, 2018) (PATIL; KASTURI, 2016) (SKLAN; DARIEL, 1992) .

2.2. Programação Matemática Linear

De fato, são muito abrangentes os casos de problemas de otimização em tomada de decisão que envolvem programação matemática, incluindo problemas de produção, distribuição e armazenamento (RAIMUNDO, 2014) (BARBOSA, 2014). Sua formulação mais simples consiste na busca da melhor distribuição de recursos capaz de atender uma função-objetivo linear e restrições lineares, conduzindo a um problema de programação linear (SKLAN; DARIEL, 1992) (BARBOSA, 2014). Em uma descrição rápida, a programação linear requer três componentes (PATIL; KASTURI, 2016) (SKLAN; DARIEL, 1992):

- Variáveis de decisão, associadas aos recursos utilizados no problema;
- Função-objetivo, a qual expressa matematicamente o que se quer ver presente na solução ótima;
- Restrições ou condições de contorno envolvidas, geralmente descritas na forma de equações e inequações lineares.

Como um exemplo ilustrativo de definição desses três elementos, considerando um problema fictício de dieta alimentar, tem-se:

- Quais alimentos (dentre um universo de alimentos disponíveis para seleção) devem ser consumidos, sendo que cada alimento tem seu custo associado e sua especificação de composição nutricional (informações essas disponíveis a priori).
- Como funções-objetivo, pode-se considerar simultaneamente maximizar o seguimento de um padrão de distribuição de energia e quantidade de alimentos ao longo das refeições e minimizar o custo total de aquisição e preparo.
- Quais calorias e nutrientes (fibras, proteínas, vitaminas e sais minerais) são necessários para o consumo humano visando atender restrições diárias (por exemplo, valores mínimos e/ou máximos).

Para montar este modelo por meio de equações e inequações, é preciso definir as variáveis de decisão, formular a função-objetivo e, por fim, incluir as restrições. Numa representação matemática, tem-se:

- Vetor de Quantidade de Alimento, representado por x de tamanho n , em que x_i é a quantidade do alimento i , $x_i \in Z_+$ e $1 \leq i \leq n$;
- Vetor de Custos de Alimento, representado por c de tamanho n , em que c_i é o custo real unitário do alimento i , $c_i \in R_+$ e $1 \leq i \leq n$;
- Matriz de Nutrientes associados aos alimentos, representado por R de tamanho $m \times n$, em que r_{ji} é o valor real do nutriente j no alimento i , $r_{ji} \in R_+$, $1 \leq j \leq m$ e $1 \leq i \leq n$;
- Vetor de Restrições de Nutriente, representado por b de tamanho m , em que b_j é o valor real da restrição do nutriente j , $b_j \in R_+$ e $1 \leq j \leq m$;

Minimizar a função-objetivo:

$$\min_x f(x) = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n \quad (1)$$

onde c_n é custo por unidade do n -ésimo alimento, sujeito a:

$$\begin{aligned} r_{11}x_1 + r_{12}x_2 + r_{13}x_3 + \dots + r_{1n}x_n &\geq b_1 \text{ (Restrição 1),} \\ r_{21}x_1 + r_{22}x_2 + r_{23}x_3 + \dots + r_{2n}x_n &\geq b_2 \text{ (Restrição 2),} \\ r_{31}x_1 + r_{32}x_2 + r_{33}x_3 + \dots + r_{3n}x_n &\geq b_3 \text{ (Restrição 3),} \\ \dots & \\ r_{m1}x_1 + r_{m2}x_2 + r_{m3}x_3 + \dots + r_{mn}x_n &\geq b_m \text{ (Restrição m),} \end{aligned} \quad (2)$$

sendo r_{mn} o valor por unidade da restrição m do n -ésimo alimento.

A solução deve indicar que alimentos vão ser consumidos e em que quantidade, para atender a necessidade de uma pessoa. A programação linear vai em busca de soluções factíveis ótimas.

Mesmo não sendo o caso da formulação acima, é comum considerar variáveis binárias ou inteiras. A fim de resolver problemas de programação matemática que requerem o uso de variáveis inteiras, uma abordagem mista pode ser adotada, combinando simplex e o método de busca em árvore denominado *Branch-and-Bound*. Esta abordagem mista é frequentemente complementada por técnicas de redução de domínio baseadas em programação de restrições ou geração automática de cortes. Essas melhorias reduzem o escopo da busca e

melhoram consideravelmente o desempenho do algoritmo de solução. Todas essas extensões estão atualmente incluídas nos principais *solvers* da área de programação linear (SANTOS; SICHIERI; DARMON et al., 2018) (DOOREN, 2018) (PATIL; KASTURI, 2016) (SKLAN; DARIEL, 1992) (VIEUX, MAILLOT, DREWNOWSKI, 2019). Extensões que consideram funções-objetivo e/ou restrições não-lineares em aplicações de dietas alimentares são também encontradas na literatura (JARDIM et al., 2013) (BARRÉ; PERIGNON; 2018). No entanto, aqui vamos nos restringir a funções-objetivo e restrições lineares, empregando o Gurobi (<https://www.gurobi.com/>) como *solver*, embora outros *solvers* para programação matemática pudessem ser adotados.

2.4. Problemas de otimização multiobjetivo

Mesmo que não seja considerado dessa forma, a maioria dos problemas de otimização de interesse prático apresenta mais de um objetivo a ser otimizado. Basta cada pessoa observar os eventos de tomada de decisão em sua vida cotidiana para constatar que, geralmente, nas mais variadas situações, mais de um objetivo conflitante está envolvido, como por exemplo minimizar o tempo de execução de uma tarefa e maximizar a qualidade do resultado.

Quando o problema de otimização contém apenas uma função-objetivo ou uma combinação linear de múltiplas funções-objetivo, ele é denominado problema de otimização mono-objetivo. Por outro lado, quando o problema trabalha com múltiplas funções-objetivo conflitantes entre si, ele é denominado problema de otimização multiobjetivo (CARVALHO, 2014) (COELLO, 2006) (VELDHUIZEN, 1999).

Voltando ao cenário fictício do problema de dieta alimentar, pode-se definir dois objetivos conflitantes, sendo que a primeira função-objetivo é minimizar o custo de aquisição e preparo dos alimentos e a segunda função-objetivo é maximizar a energia total dos alimentos. Chega-se, então, à seguinte formulação matemática:

- Vetor de Alimentos X de tamanho n em que $x_i \in X$, $1 \leq i \leq n$, é a quantidade unitária do i -ésimo alimento;
- Vetor de custos C de tamanho n em que $c_i \in C$, $1 \leq i \leq n$, é o custo por unidade (incluindo o tempo de preparo) do i -ésimo alimento;

- Vetor de energia E de tamanho n em que $e_i \in E$, $1 \leq i \leq n$, é o valor de energia por unidade do i -ésimo alimento;
- Matriz de Restrições de Nutrientes H de tamanho $k \times n$, em que $h_{ji} \in R$, $1 \leq j \leq k$ e $1 \leq i \leq n$, é o valor por unidade do j -ésimo nutriente do i -ésimo alimento;
- Matriz de Restrições de Nutrientes S de tamanho $g \times n$, em que $s_{ji} \in R$, $1 \leq j \leq g$ e $1 \leq i \leq n$, é o valor por unidade do j -ésimo nutriente do i -ésimo alimento.
- Vetor de Restrições Mínimos B de tamanho k em que $b_i \in B$, $1 \leq i \leq k$, é o valor da i -ésima restrição.
- Vetor de Restrições Máximos D de tamanho g em que $d_i \in D$, $1 \leq i \leq g$, é o valor da i -ésima restrição.

Um problema multiobjetivo típico no contexto de dieta alimentar pode ser então formulado como segue:

Otimizar as funções-objetivo a seguir:

$$\begin{aligned} f_1(x) &= c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + \dots + c_nx_n \\ f_2(x) &= e_1x_1 + e_2x_2 + e_3x_3 + \dots + e_nx_n \end{aligned} \quad (3)$$

onde c_n é o custo por unidade da n -ésima variável de decisão x_n da função-objetivo f_1 e e_n é o custo por unidade da n -ésima variável de decisão x_n da função-objetivo f_2 , sujeito a:

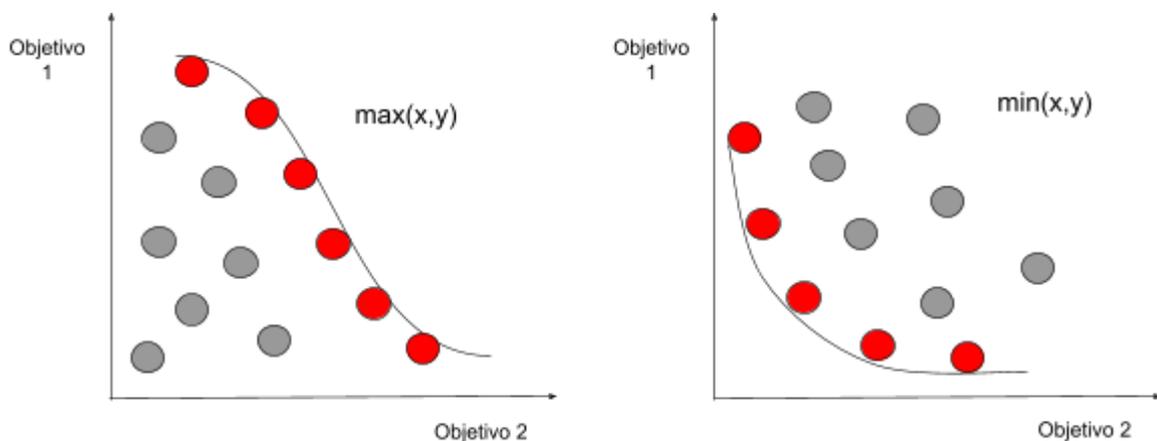
$$\begin{aligned} h_{11}x_1 + h_{12}x_2 + h_{13}x_3 + \dots + h_{1n}x_n &\geq b_1 \\ h_{21}x_1 + h_{22}x_2 + h_{23}x_3 + \dots + h_{2n}x_n &\geq b_2 \\ \dots & \\ h_{k1}x_1 + h_{k2}x_2 + h_{k3}x_3 + \dots + h_{kn}x_n &\geq b_k \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} s_{11}x_1 + s_{12}x_2 + s_{13}x_3 + \dots + s_{1n}x_n &\leq d_1 \\ s_{21}x_1 + s_{22}x_2 + s_{23}x_3 + \dots + s_{2n}x_n &\leq d_2 \\ \dots & \\ s_{g1}x_1 + s_{g2}x_2 + s_{g3}x_3 + \dots + s_{gn}x_n &\leq d_g \end{aligned} \quad (4)$$

onde a soma das restrições k e g resulta o total de m restrições, h_{kn} é o valor por unidade do k -ésimo nutriente para a n -ésima variável x_n e s_{gn} é o valor por unidade do g -ésimo nutriente da n -ésima variável x_n .

Importante ressaltar que, nos problemas com múltiplos objetivos conflitantes, não existe a melhor solução que potencializa todos os objetivos. Na verdade, existem compromissos ótimos entre os objetivos, em que soluções eficientes (não-dominadas) povoam a fronteira de Pareto, sendo denominadas soluções Pareto-ótimas. Qualquer outra solução que não pertença à fronteira de Pareto é dita ser não-eficiente ou dominada ao menos por uma solução Pareto-ótima (MENDES, 2013) (CARVALHO, 2014).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 2. Exemplos de fronteira de Pareto, evidenciando soluções dominadas (em cinza) e não-dominadas (em vermelho), para cenários de maximização e de minimização dos objetivos.

Logo, uma solução Pareto-ótima é aquela em que não é possível melhorar o atendimento de algum objetivo sem, ao mesmo tempo, piorar o atendimento de ao menos um outro objetivo envolvido (FERREIRA, 2017) (ZHENKUI; ZHEN, 2009) (MENDES, 2013) (CARVALHO, 2014). A Figura 2 contém dois exemplos de fronteira de Pareto, onde o primeiro (à esquerda) envolve a maximização de dois objetivos e o segundo (à direita) envolve a minimização de dois objetivos. Os pontos vermelhos são os pontos de soluções eficientes ou Pareto-ótimas e estão na fronteira, definida pela curva contínua. Por sua vez, os pontos em cinzas são soluções dominadas por pelo menos uma solução Pareto-ótima.

A otimização multiobjetivo, então, deve ser viabilizada por técnicas de busca capazes de promover o povoamento uniforme da fronteira de Pareto, ou uma boa aproximação desta fronteira. Pensando em dietas alimentares, esse elenco diverso de soluções candidatas não-dominadas, ao final da aplicação da busca, representa um diferencial desta proposta, pois a diversidade não é arbitrária, mas vem atrelada com a propriedade de não-dominância ou de solução eficiente.

2.5. Problemas de otimização binível

Uma limitação importante da formulação acima é o fato de que se supõe a disponibilidade a priori da lista de alimentos que compõem a dieta. No entanto, quando existem uma explosão combinatória de possibilidades de composição dos alimentos da dieta e múltiplos objetivos conflitantes a serem otimizados, é conveniente expressar o problema da dieta como um problema de otimização multiobjetivo binível (LIU; GAO; ZHANG; MENG; 2015) (SINHA et al., 2018), em que se deve buscar combinações de alimentos e, a partir de cada proposta de combinação de alimentos, deve-se encontrar a sua quantidade ótima. Tem-se, assim, um problema de programação matemática atrelado a cada solução candidata de um problema combinatório multiobjetivo. A formulação geral de um problema de otimização binível multiobjetivo assume a forma (SINHA et al., 2018):

$$\begin{aligned}
 & \min_x [F_1(x, y) \quad F_2(x, y)] \\
 & \text{sujeito a} \\
 & \quad G(x, y) \leq 0 \\
 & \quad \min_y f(x, y) \\
 & \quad \text{sujeito a} \\
 & \quad \quad g(x, y) \leq 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

O tomador de decisão de nível superior, também chamado de líder, tem controle sobre as variáveis x e toma sua decisão primeiro. O tomador de decisão de nível inferior, também chamado de seguidor, controla as variáveis y e reage à decisão do líder, sendo que as variáveis y são definidas em resposta a cada x proposto.

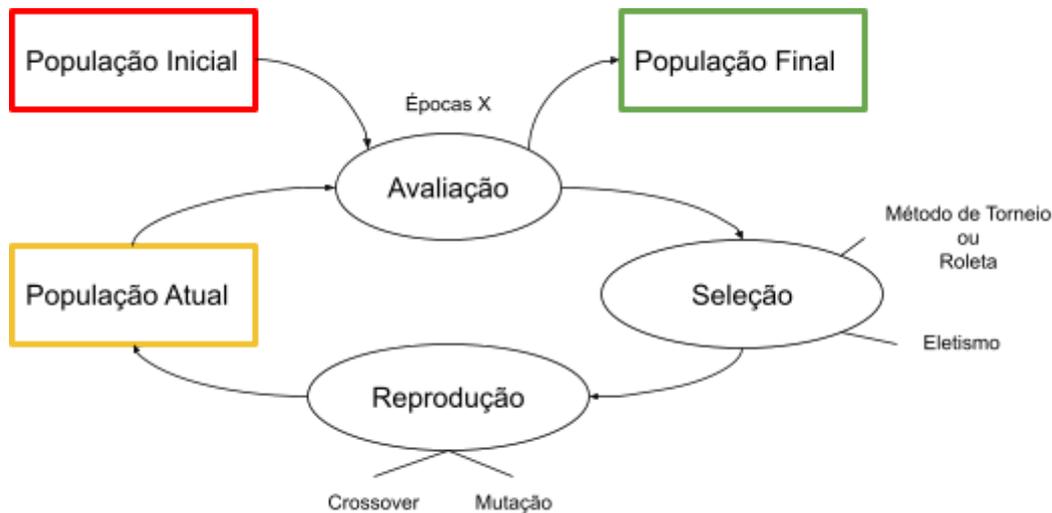
No contexto do problema de dieta alimentar, as variáveis x definem que alimentos irão compor a dieta (sendo um problema combinatório e multiobjetivo que será abordado por um algoritmo genético multiobjetivo) e as variáveis y especificam a quantidade ótima de cada alimento selecionado em x (sendo um problema de programação matemática mono-objetivo).

2.6. Algoritmos evolutivos

Particularmente quando o espaço de busca é não-estruturado e não admite uma forma sistemática de obtenção da solução ótima (ou das soluções Pareto-ótimas), cabem meta-heurísticas computacionais de busca, que empregam uma população de soluções candidatas a cada iteração. Destacam-se aqui os algoritmos evolutivos, centrados na ideia de amostragem aleatória do espaço de busca e direcionamento da busca de acordo com o valor de *fitness* atribuído a cada solução candidata, geração após geração (USP, 2021) (MIRJALILI, 2019).

Um algoritmo evolutivo eficiente na busca da solução do problema é capaz de gerenciar mecanismos de exploração e intensificação da busca, empregando uma quantidade não-explosiva de recursos computacionais para identificar e manter as melhores soluções do espaço de busca do problema (MIRJALILI, 2019) (BÄCK; FOGEL; MICHALEWICZ, 2000). Com isso, essas técnicas conseguem realizar buscas efetivas em espaços não-estruturados, embora não garantam a obtenção da solução ótima.

Um dos mais conhecidos algoritmos evolutivos é o algoritmo genético (GA, *genetic algorithm*), que inicia com uma população de soluções candidatas amostradas aleatoriamente no espaço de busca (USP, 2021) (OBITKO, 1998). Cada solução candidata é um indivíduo, representado computacionalmente por um vetor de atributos que o caracteriza única e completamente. Este vetor de atributos representa o que em Biologia se conhece por genoma do indivíduo. Em seguida, é simulado em computador o princípio de sobrevivência do mais apto, presente na teoria de seleção natural de Darwin (MIRJALILI, 2019) (DEB, 2011) (COELLO, 2006) (DEB; PRATAP; AGARWAL; MEYRIVAN, 2002) (BÄCK; FOGEL; MICHALEWICZ, 2000) (OBITKO, 1998). A Figura 3 contém um diagrama dos passos do Algoritmo Evolutivo, em que a simulação da sobrevivência do mais apto é um ciclo que se repete por diversas iterações, sendo que cada iteração é denominada uma geração, incluindo avaliação, seleção e reprodução.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 3. Diagrama descrevendo os passos de um algoritmo evolutivo.

A definição da próxima geração, a partir de indivíduos da população atual que já dispõem de seus respectivos valores de *fitness* (grau de aptidão do indivíduo), envolve três operações básicas (USP, 2021) (MIRJALILI, 2019) (OBIKO, 1998) (COELHO, 2006):

- Seleção, que privilegia a escolha dos indivíduos mais aptos, a partir de processos de decisão estocástica, como os métodos da roleta ou torneio.
- Crossover, que envolve a formação de pares de indivíduos para produzir soluções híbridas: o novo indivíduo é criado por meio da mescla das características dos indivíduos progenitores. O crossover uniforme é um operador bem popular, sendo que cada elemento do vetor de atributos do novo indivíduo tem uma probabilidade de 50% de ser proveniente do progenitor 1 e 50% de ser proveniente do progenitor 2.
- Mutação, que insere perturbações aleatórias nos novos indivíduos produzidos por crossover, permitindo a exploração local de novas soluções no espaço de busca, o que faz com que a probabilidade de mutação geralmente seja feita a taxas baixas. Normalmente, na literatura, a taxa de mutação tem valores baixos, entre 1% e 20%.

A cada geração, pode ser aplicado o elitismo, que preserva o melhor indivíduo da geração anterior, caso nenhum indivíduo da nova geração tenha *fitness* igual ou superior àquele do melhor indivíduo da geração anterior (USP, 2021) (MIRJALILI, 2019) (OBITKO, 1998).

Como critério de parada, pode ser empregado um número máximo de gerações ou um monitoramento da diversidade da população (DEB, 2011) (COELHO, 2006) (DEB; PRATAP; AGARWAL; MEYRIVAN, 2002).

Algumas adaptações junto ao algoritmo genético são necessárias quando o problema de otimização é multiobjetivo, de modo a atrair a população de soluções candidatas na direção da fronteira de Pareto e de modo que elas se espalhem o mais uniformemente possível ao longo da fronteira de Pareto, fornecendo assim um elenco diverso de soluções não-dominadas e com diferentes *trade-offs* entre os objetivos (BEUME; NAUJOKS; EMMERICH, 2006) (DEB; PRATAP; AGARWAL; MEYRIVAN, 2002).

Alguns algoritmos evolutivos conhecidos que trabalham com o conceito de otimização multiobjetivo são SPEA2 (ZITZLER; LAUMANN; THIELE, 2001), NSGA-II (DEB; PRATAP; AGARWAL; MEYRIVAN, 2002) e SMS-EMOA (BEUME; NAUJOKS; EMMERICH, 2006). Neste trabalho, foi definido o emprego do algoritmo NSGA-II, o qual apresenta uma forma competente de distribuir soluções ao longo da fronteira de Pareto, empregando o conceito de *crowding distance* (DEB; PRATAP; AGARWAL; MEYRIVAN, 2002) (OLIVEIRA; CALDEIRA; TRATTNER; MARINHO, 2018). No próximo capítulo, detalhamos a participação do algoritmo NSGA-II no esquema de solução do problema da dieta.

Na literatura, já existem casos de estudo envolvendo a aplicação de algoritmos evolutivos multiobjetivos para a resolução de problemas de dieta alimentar. O primeiro caso de estudo envolve implementar uma tomada de decisão para refeições diárias (ZHENKUI; ZHEN, 2009). Esta programação utilizou o algoritmo *Differential Evolution*, que recebia informações do consumidor, dos alimentos, das restrições dos nutrientes e dos preços de cada alimento. Outro caso praticado com o algoritmo NSGA-II envolveu a produção de um menu diário contendo todos os nutrientes necessários com custo mínimo e energia máxima (KALDIRIM; KOSE, 2006).

No primeiro caso de estudo, a evolução diferencial buscava diretamente definir a quantidade de um conjunto pré-definido de alimentos compondo refeições diárias, enquanto a nossa proposta recorre a um *solver* de programação matemática (no caso, o Gurobi) que não especifica previamente o conjunto de alimentos. Na programação deste caso, as entradas foram os alimentos, enquanto as funções-objetivo eram quantidade de energia, proteína e cálcio que deveriam satisfazer as restrições de consumo de nutrientes indicadas para uma pessoa de 60 kg. Ao final, o programa emitia a quantidade de cada alimento em cada refeição (ZHENKUI; ZHEN, 2009).

O segundo caso de estudo, que já utiliza o NSGA-II, contém características semelhantes ao nosso projeto, como a utilização de uma base de dados de alimentos e nutrientes. No entanto, mais uma vez a quantidade de cada alimento é buscada pelo algoritmo evolutivo, sem recorrer a um *solver* de programação matemática. Os autores também criaram uma interface que permite inserir informações do usuário e apresentar os resultados. Assim as entradas eram a idade e gênero do usuário; e a seleção de categorias de alimentos. As funções-objetivo presentes eram maximização de energia e minimização de custo (KALDIRIM; KOSE, 2006).

2.7. Tabelas dos Alimentos

Sabe-se que um alimento contém vários nutrientes. Existem em torno de 20 tipos de nutrientes e outras características composicionais de cada alimento (NEPA, 2011) (NCBI, 2011). Nas pesquisas realizadas, os nutrientes mais utilizados para resolver o problema das dietas foram: Proteína, Cálcio, Energia, Carboidratos, Lipídios, Ferro, Vitamina A e Sódio. Certos estudos aplicaram preços unitários reais para alcançar o objetivo principal do problema (minimizar o custo total de um conjunto de alimentos) (SANTOS; SICHIERI; DARMON, et al., 2018) (DOOREN, 2018) (PATIL; KASTURI, 2016) (SKLAN; DARIEL, 1992) (VIEUX; MAILLOT; DREWNOWSKI, 2019) (ZHENKUI; ZHEN, 2009) (KALDIRIM; KOSE, 2006). Para cada nutriente, existe um valor numérico que pode ser tipo inteiro ou real, dependendo da quantidade medida e da adaptação realizada. Além disso, a medição dos nutrientes é realizada a cada 100 gramas de alimento (NEPA, 2011).

Portanto, decidiu-se que os dados vão ser trabalhados a cada 100 gramas e os principais nutrientes devem ser energia, proteína, cálcio e carboidratos, os quais

terão restrições de consumo máximo e mínimo. Os nutrientes restantes podem ser considerados como opcionais, com cada restrição adicional passível de inserção a partir de uma interface, que os converte em novas regras e fórmulas interpretáveis pelo *solver* aqui adotado (no caso, o Gurobi). Como uma ilustração para compreender o formato dos dados dos nutrientes, a Tabela 1 apresenta a composição de dez nutrientes do alimento Arroz Integral Cozido.

Arroz Integral Cozido (100 gramas)						
Nutriente	Valor	Unidade		Nutriente	Valor	Unidade
Energia	123,53	kcal		Proteína	2,59	g
Cálcio	5,2	mg		Carboidratos	25,81	g
Fibra Alimentar	2,75	g		Sódio	1,24	mg
Ferro	0,26	mg		Zinco	0,68	mg
Fósforo	105,85	mg		Vitamina A	0,0	mcg

Fonte: Elaboração própria. Dados fornecidos pela TACO 4 (NEPA, 2011)

Tabela 1. Composição dos nutrientes do alimento Arroz Integral Cozido, a cada 100 gramas.

3. METODOLOGIA

3.1. Introdução

O desenvolvimento do sistema de recomendação multiobjetivo para dietas alimentares requer o emprego de informações nutricionais acerca dos alimentos e a inserção estruturada e sistemática das restrições de dieta alimentar fornecidas por um especialista. Todas essas informações e restrições conduzem a um problema de programação matemática binível com múltiplos objetivos a serem otimizados. No nível inferior, para cada proposta de composição alimentar, o *solver* de programação matemática é capaz de determinar a quantidade ótima de cada item da composição alimentar, resolvendo um problema de programação matemática sob uma perspectiva mono-objetivo. A ferramenta utilizada para esta otimização é o Gurobi, um *solver* privado que atende os requisitos deste projeto (<https://www.gurobi.com/>) (GUROBI, 2021). Vale ressaltar que outros *solvers* com funcionalidades equivalentes existem e poderiam ter sido adotados em substituição ao Gurobi. No nível superior, cabe ao *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) explorar o espaço das alternativas de composição alimentar, resolvendo um problema combinatório sob uma perspectiva multiobjetivo.

O espaço de busca do problema combinatório é especificado a partir do momento em que se tem previamente definidos quais são as categorias de alimentos, quais alimentos candidatos estão presentes em cada uma dessas categorias, e quais categorias de alimentos compõem cada uma das quatro refeições diárias: café da manhã, almoço, lanche e jantar. Como um exemplo didático, suponha que existam 12 categorias de alimentos, cada qual com 20 opções de alimentos (evidentemente, o número de alimentos por categoria não precisa ser o mesmo, sendo assim considerado aqui por simplicidade). Se o café da manhã tem 4 alimentos de categorias diferentes, o almoço tem 6 alimentos de categorias diferentes, o lanche tem 3 alimentos de categorias diferentes e o jantar tem 5 alimentos de categorias diferentes, então existem 18 alimentos que serão consumidos num dia, ao longo das quatro refeições, o que permite concluir que a cardinalidade do espaço de busca é $20^{18} \approx 2,62 \times 10^{23}$. Repare que um número expressivo de formulações para o problema da dieta alimentar, na literatura, considera já definida a lista de alimentos (ou então a busca em um conjunto bem limitado de opções), enquanto a nossa proposta faz uma busca num espaço com

um número explosivo de listas alternativas de alimentos, visando identificar listas de alimentos diversas e que produzem soluções eficientes para o problema da dieta. Estamos descartando aqui a existência de mais de um alimento de uma mesma categoria em cada refeição, mas refeições distintas podem ser contempladas com um mesmo alimento. Por exemplo, é possível ter arroz no almoço e no jantar.

Produz-se então um problema de otimização binível, em que, para cada solução candidata levantada pelo NSGA-II (lista completa de quais alimentos irão compor a dieta diária), o Gurobi deve encontrar a quantidade ótima de cada alimento que compõe a lista.

A composição modular do projeto e o seu fluxo de informação serão descritos em detalhes a seguir.

3.2. Procedimentos computacionais

Foi utilizada a linguagem Python versão 3, assim como bibliotecas desta linguagem, além, evidentemente, o Gurobi e o NSGA-II. Construiu-se um banco de dados relacional SQLite3 para armazenar as informações nutricionais dos alimentos, as restrições supostamente definidas por especialistas em nutrição e as condições de contorno do problema da dieta a ser considerado. Os dados sobre os alimentos e os dados de consumo necessários ao corpo humano foram obtidos de:

- Tabela Brasileira de Composição de Alimentos Versão 4 (NEPA, 2011);
- Tabelas de Recomendação Diária e Restrições Adequadas (NCBI, 2011);
- Tabelas *Canada Dietary Reference Intakes* (2010).

A forma como essas informações e restrições devem ser alimentadas no Gurobi foram apreendidas da literatura (SKLAN, DARIEL, 1992) (PATIL, KASTURI, 2016) e da documentação da própria ferramenta (GUROBI, 2021). O NSGA-II, por sua vez, requer a definição das funções-objetivo, da representação das soluções candidatas e dos operadores genéticos associados, sendo que foram encontradas instruções disponibilizadas pelas comunidades de código aberto (*open source*) (RESZELEWSKI; MIELNIK, 2016), (BAO; QUAN; THO; GARG, 2021) e também na literatura (DEB; PRATAP; AGARWAL; MEYRIVAN, 2002).

3.3. Base de Dados

A Tabela Brasileira de Composição de Alimentos Versão 4 (TACO4) foi referenciada para a criação do banco de dados de alimentos. Ela contém a classificação organizada dos alimentos por categorias alimentares, além de incluir os nutrientes de cada alimento. Nesta referência, foram encontrados 597 alimentos separados em 15 categorias alimentares. Na composição de cada alimento, foram quantificados 24 tipos de nutrientes e 4 características (identificador, nome, cru ou cozido, índice de umidade), somando 28 atributos. A Tabela 2 contém o escopo de quais informações a TACO4 armazena.

Categorias Alimentares da TACO4					
Cereais e Derivados	Verduras, Hortaliças e Derivados	Frutas e Derivados	Gorduras e Óleos	Pescados e Frutos do Mar	SubTotal
63	99	96	14	50	322
Carnes e Derivados	Leites e Derivados	Bebidas Alcoólicas e Não Alcoólicas	Ovos e Derivados	Produtos Açucarados	SubTotal
123	24	14	7	20	188
Miscelâneas	Outros Alimentos Industrializados	Alimentos Preparados	Leguminosas e Derivados	Nozes e Sementes	SubTotal
9	5	32	30	11	87
Total					597
Unidades dos 24 Nutrientes dos Alimentos (100g)					
Atributo	Unidade	Atributo	Unidade	Atributo	Unidade
Proteína	g	Energia	kcal/KJ	Colesterol	mg
Lipídios	g	Carboidrato	g	Fibra-Alimentar	g
Cálcio	mg	Cinzas	g	Manganês	mg
Magnésio	mg	Ferro	mg	Fósforo	mg
Potássio	mg	Sódio	mg	Cobre	mg
Zinco	mg	Retinol	mcg	Vitamina C	mg
RE	mcg	RAE	mcg	Tiamina	mg
Riboflavina	mg	Piridoxina	mg	Niacina	mg

Fonte: NEPA, 2006

Tabela 2. Escopo de informações da TACO4.

Além disso, as tabelas de restrições de nutrientes alimentares (NCBI, 2011), (CANADA, 2010) guardam valores de requisitos mínimos, recomendáveis e máximos; e separam estas condições por diferentes faixas de idade e gênero do ser humano. Assim, este acesso de referência oferece a oportunidade de projetar um sistema que pode atender dietas alimentares para diferentes etapas de crescimento biológico do indivíduo. Essa é uma extensão importante quando se compara com outros trabalhos da literatura, geralmente restritos a um certo conjunto de alimentos e a uma pessoa com gênero e idade específicos.

Estas tabelas apresentam as recomendações de consumo adequadas e máximas de 29 nutrientes entre vitaminas, sais minerais e macronutrientes; e são mapeadas por 5 grupos de estágio de vida (NCBI, 2011). Ou seja, as tabelas têm medições de consumo recomendado de nutrientes para diferentes idades e ambos os sexos do ser humano. Todavia, estas tabelas tinham algumas lacunas de informações de tolerância e foram preenchidos pelas tabelas *Canada Dietary Reference Intakes* (2010), principalmente na questão de encontrar valores máximos de consumo para que não haja risco de saúde à pessoa (NCBI, 2011), (CANADA, 2010).

A Tabela 3 contém o escopo das tabelas de restrições de nutrientes alimentares. Deve ficar claro que esses intervalos de tolerância devem ser devidamente moldados por especialistas em nutrição, de acordo com as especificidades da dieta. O fundamental aqui é disponibilizar ao especialista a possibilidade dele atuar nesses intervalos de tolerância, promovendo assim dietas personalizadas e suficientemente flexíveis para contemplar uma grande variedade de cenários.

As estruturas das tabelas podem ser exibidas no Anexo, que contém o modelo completo da Tabela Brasileira de Composição de Alimentos Versão 4 (TACO4) para o Arroz Integral Cozido, e da Tabela de Recomendação Diária e Restrições Adequadas.

Grupos de Fase de Vida					
Bebês	Crianças	Homens Mulheres		Gravidez Lactação	
0 - 6 meses	1 - 3 anos	9 - 13 anos	14 - 18 anos	14 - 18 anos	14 - 18 anos
6 - 12 meses	6 - 12 anos	19 - 30 anos	31 - 50 anos	19 - 30 anos	19 - 30 anos
		51 - 70 anos	71 ou mais	31 - 50 anos	31 - 50 anos
Unidades dos 29 Nutrientes dos Alimentos					
Atributo	Unidade	Atributo	Unidade	Atributo	Unidade
Cálcio	mg/d	Cromo	mg/d	Cobre	md/d
Fluoreto	mg/d	Iodo	µg/d	Ferro	mg/d
Magnésio	mg/d	Manganês	mg/d	Molibdênio	µg/d
Fósforo	mg/d	Selênio	µg/d	Zinco	mg/d
Potássio	g/d	Sódio	mg	Cloreto	g/d
Vitamina A	µg/d	Vitamina C	mg/d	Vitamina D	µg/d
Vitamina E	mg/d	Vitamina K	µg/d	Tiamina	mg/d
Riboflavina	mg/d	Niacina	mg/d	Vitamina B6	µg/d
Folato	µg/d	Vitamina B12	µg/d	Ácido pantotênico	mg/d
Biotina	µg/d	Colina	mg/d	Total	29

Fonte: NCBI, 2010

Tabela 3. Escopo de informações da Tabela de Restrição de Nutrientes.

Um banco de dados relacional foi montado para facilitar o manuseio do armazenamento e leitura de todas as informações das tabelas encontradas. Além disso, qualquer unidade que esteja diferente foi convertida para coexistir com as unidades da tabela TACO4. O banco de dados estruturado contém 17 tabelas, sendo 15 associadas às categorias alimentares e 2 dedicadas às restrições dos nutrientes. A Figura 4 e a Figura 5 são retratos de uma parte das tabelas do banco de dados criado pelo autor. A primeira figura é a tabela da categoria Cereais, enquanto a segunda figura é a tabela das restrições.

Id	Nome	Cru	Umidade	Energia1	Energia2	Proteína	Lipídeos	Colesterol	Carboidrato	FibraAlimentar	
1	1	Arroz, integral, ...	0	70.14	123.53	516.87	2.59	1.0	0.0	25.81	2.75
2	2	Arroz, integral, cru	1	12.18	359.68	1504.89	7.32	1.86	0.0	77.45	4.82
3	3	Arroz, tipo 1, cozido	0	69.11	128.26	536.63	2.52	0.23	0.0	28.06	1.56
4	4	Arroz, tipo 1, cru	1	13.22	357.79	1496.99	7.16	0.34	0.0	78.76	1.64
5	5	Arroz, tipo 2, cozido	0	68.73	130.12	544.42	2.57	0.36	0.0	28.19	1.07
6	6	Arroz, tipo 2, cru	1	13.16	358.12	1498.36	7.24	0.28	0.0	78.88	1.72
7	7	Aveia, flocos, crua	1	9.13	393.82	1647.75	13.92	8.5	0.0	66.64	9.13
8	8	Biscoito, doce, ...	0	3.22	442.82	1852.76	8.07	11.97	0.0	75.23	2.1
9	9	Biscoito, doce, ...	0	2.18	471.82	1974.11	6.4	19.58	0.01	70.55	2.96

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 4. Imagem de parte da tabela de cereais, uma das 15 categorias presentes no banco de dados relacional SQLite3.

	CromoMIN	CromoMAX	FluoretoMIN	FluoretoMAX	IodoMIN	IodoMAX	ChumboMIN	ChumboMAX	SelenioMIN	SelenioMAX
	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter	Filter
1	0.2	0.34	0.01	0.7	0.11	0.187	0.002	0.0034	0.015	0.045
2	5.5	9.35	0.5	0.9	0.13	0.221	0.003	0.0051	0.02	0.06
3	11.0	18.7	0.7	1.3	0.09	0.153	0.017	0.3	0.02	0.09
4	15.0	25.5	1.0	2.2	0.09	0.153	0.022	0.6	0.03	0.15
5	20.0	34.0	3.0	10.0	0.15	0.255	0.045	2.0	0.055	0.4
6	20.0	34.0	3.0	10.0	0.15	0.255	0.045	2.0	0.055	0.4
7	21.0	35.7	2.0	10.0	0.12	0.204	0.034	1.1	0.04	0.28
8	24.0	40.8	3.0	10.0	0.15	0.255	0.043	1.7	0.055	0.4
9	25.0	42.5	2.0	10.0	0.12	0.204	0.034	1.1	0.04	0.28
10	25.0	42.5	3.0	10.0	0.15	0.255	0.045	2.0	0.055	0.4
11	25.0	42.5	3.0	10.0	0.15	0.255	0.045	2.0	0.055	0.4
12	29.0	49.3	3.0	10.0	0.22	0.374	0.05	1.7	0.06	0.4

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 5. Imagem da tabela de restrições, uma das 2 tabelas de restrições presente no banco de dados relacional SQLite3.

A Figura 4 apresenta características de alimentos que são classificados na categoria “cereais” (NEPA, 2011). Cada linha da tabela contempla um alimento com suas características (identificador, nome, umidade) e nutrientes (Energia, Proteína, Carboidratos, etc), como é possível observar no cabeçalho. Todas as 15 categorias de alimentos seguem a mesma estrutura apresentada na Figura 4 para “cereais”.

A tabela de restrições (Figura 5), por sua vez, apresenta os dados mínimos e máximos de nutrientes por faixa de idade e gênero do ser humano. Assim, cada linha da tabela representa as recomendações de um gênero com uma faixa de idade. Por exemplo, a linha 1 dessa tabela contém as recomendações nutricionais para uma pessoa em fase infantil, gênero masculino ou feminino, entre 0 e 6 meses

de idade. Como mais um exemplo, a linha 5 contém as recomendações nutricionais para uma pessoa de gênero masculino com idade entre 9 e 13 anos. Vale ressaltar que, independente do gênero, as faixas de idade entre 19 e 70 anos não sofrem muitas alterações de consumo mínimo e máximo de nutrientes. As principais variações estão concentradas na fase de crescimento até chegar à fase adulta.

3.4. Imputação de dados faltantes

Na literatura associada aos problemas de dietas alimentares, normalmente se utiliza o atributo preço unitário tanto para compor a função-objetivo quanto para as restrições do problema (SANTOS; SICHERI; DARMON, et al., 2018) (DOOREN, 2018) (PATIL; KASTURI; 2016) (SKLAN; DARIEL, 1992) (VIEUX; MAILLOT; DREWNOWSKI, 2019). Pelo fato de não serem encontradas informações suficientes para registrar os preços unitários de todos os alimentos da tabela TACO4, optou-se pela imputação de preços fictícios. Os preços unitários dos alimentos foram sorteados aleatoriamente em uma escala linear de R\$0,10 a R\$10,00. Como já havíamos comentado por ocasião dos intervalos de tolerância para os nutrientes (que podem ser tomados da literatura ou especificados por especialistas em nutrição, quando voltados a casos específicos), o aspecto-chave aqui é permitir que se trabalhe com o preço individual de cada alimento (qualquer que seja este preço), o que torna a formulação abrangente e de ampla aplicabilidade.

Até os intervalos de tolerância para certos nutrientes apresentavam dados faltantes, particularmente os valores máximos de consumo de certos nutrientes, possivelmente pela falta de estudos de efeitos adversos associados ao consumo excessivo (NCBI, 2010, ND *meaning*). Para preencher todos os requisitos possíveis e, assim, permitir que a busca considerasse os intervalos de tolerância de todos os nutrientes, foram imputados os valores máximos dos nutrientes faltantes através da média percentual da diferença entre os valores recomendáveis e os valores máximos dos demais nutrientes existentes.

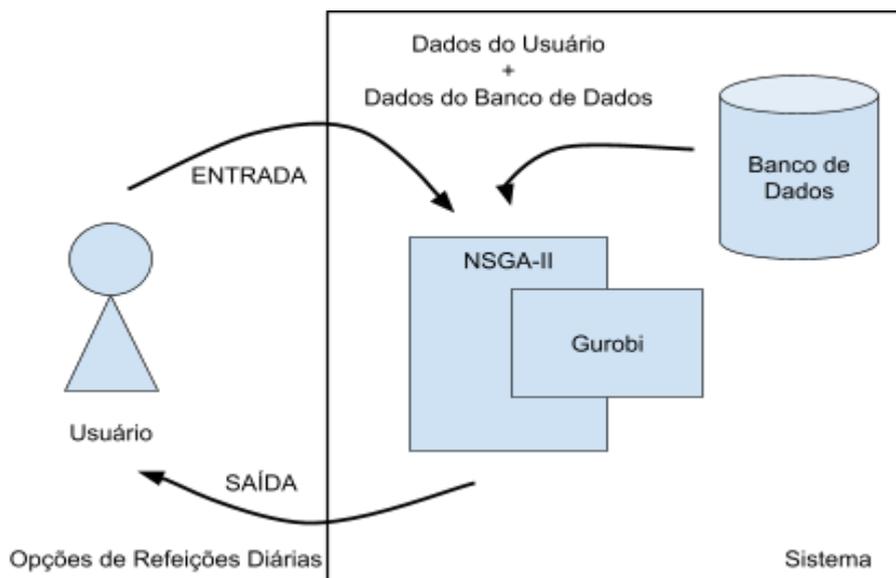
A base de cálculo foi centrada nas tabelas Canada Dietary Reference Intakes (2010). Foram estimadas as diferenças percentuais de 8 nutrientes que possuem o valor máximo de consumo definido (Cálcio, Cobre, Iodo, Ferro, Manganês, Fósforo, Vitamina A e Molibdênio), para cada grupo de faixa de vida, exceto o grupo de *bebês*, entre 6 e 12 meses, e computou-se a média percentual. Percebeu-se que o

corpo humano consegue consumir os oito nutrientes com média de 74,58% acima do valor recomendado em qualquer idade, exceto a idade de *bebês* de até 12 meses, sem efeitos danosos evidentes à saúde. A mediana calculada foi 77,03%. A menor média encontrada foi 70,95% e refere-se ao grupo de *mulheres* com idade entre 30 e 50 anos, com mediana de 74,76%. A maior média encontrada foi 78,26%, refere-se a *crianças* de 6 e 12 anos, com mediana de 80,75%. Assim, observando a média dos grupos, definiu-se o valor máximo heurístico para todos os nutrientes que o ser humano pode consumir sem impor riscos evidentes à saúde, exceto no caso dos *bebês* de até 12 meses, para os quais se adotou 70% a mais do valor recomendado.

3.5. Fluxo de Informação

A seguir, recorreu-se à elaboração e implementação do fluxo de informação necessário para que o sistema integrado solucione o problema apresentado. O autor desta monografia concebeu todo o fluxo de informação e implementou a solução do problema de otimização binível, permitindo que o NSGA-II chame o Gurobi toda vez que uma solução candidata (proposta de composição alimentar, ou seja, um subconjunto de alimentos selecionados) precisa ser avaliada.

Todo o projeto foi pensado e estruturado com conceitos de arquitetura de software, que se preocupa com a organização do sistema, bem como a definição e comunicação dos componentes de software e a lógica do fluxo de dados, dentre outros aspectos (SOMMERVILLE, 2011). Assim, compreender o fluxo de informação é um requisito para entender o funcionamento global do sistema. Seu fluxo deve ser um ciclo, iniciando e terminando com o usuário. A Figura 6 apresenta a ilustração deste fluxo de informação numa perspectiva de alto nível: o usuário insere os dados de seu interesse, capazes de especificar a dieta alimentar, e recebe ao final uma lista de soluções eficientes (com variados *trade-offs* entre os múltiplos objetivos), cada qual especificando quais alimentos consumir em cada uma das quatro refeições diárias, e em que quantidade. Esse elenco de soluções candidatas alternativas é capaz de atender todas as restrições impostas pela dieta, a não ser que não haja soluções factíveis que o par [NSGA-II + Gurobi] possa encontrar.



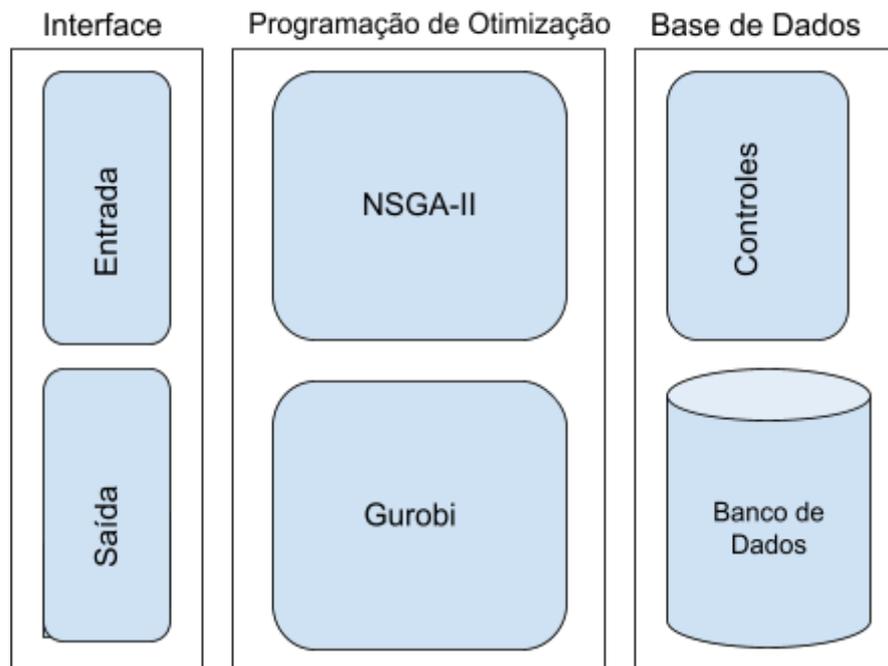
Fonte: Elaboração própria.

Figura 6. Fluxo de informação adotado pelo sistema de recomendação de dietas alimentares, formulado como um problema de otimização binível.

Através desse conceito apresentado, modelou-se o projeto de software, que foi concebido com base em três módulos (veja Figura 7):

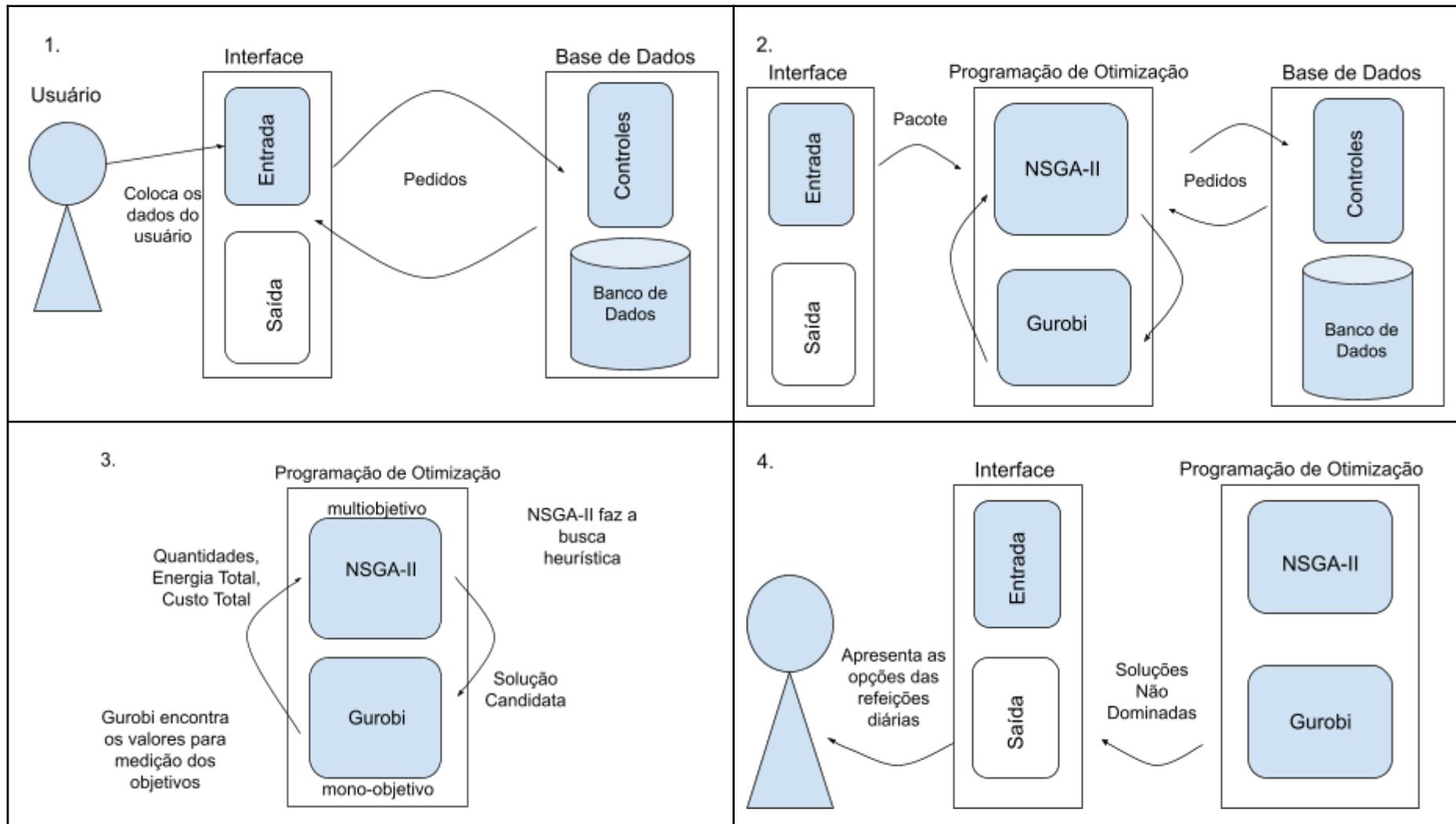
1. Interface, responsável pela coleta de dados na entrada do sistema e apresentação de soluções na saída para o usuário;
2. Programação matemática e otimização multiobjetivo, que irá integrar as ferramentas da programação matemática Gurobi e o algoritmo de otimização evolutiva multiobjetivo NSGA-II;
3. Base de Dados, responsável por armazenar as tabelas nutricionais dos alimentos e as condições de contorno da dieta, além de definir controles para a comunicação entre o banco de dados e os demais módulos do sistema.

O fluxo de informação do sistema pode ser observado na Figura 8. No módulo Interface, a Entrada do sistema recebe dados de usuário e as categorias de alimentos que o usuário deseja consumir nas quatro refeições diárias (café da manhã, almoço, lanche e jantar), a fim de seguir a dieta alimentar. Com os dados de entrada inseridos, o sistema realiza consultas ao módulo Base de Dados através dos Controles, agregando todas as informações em um pacote. Este serve como uma ferramenta útil para ter consistência e ordenação dos dados; e para transportá-los ao módulo Programação de Otimização, que é o núcleo do sistema.



Fonte: Elaboração Própria

Figura 7. Módulos constituintes do sistema de otimização multiobjetivo para dietas alimentares, formulado como um problema de otimização binível.



Fonte: Elaboração Própria

Figura 8. Fluxo de informação do sistema de recomendação multiobjetivo para dieta alimentar.

Este núcleo contém os algoritmos NSGA-II e Gurobi, que são inicializados pelo sistema. Primeiramente, o NSGA-II recebe os parâmetros do pacote, cria a população inicial de forma aleatória (cada indivíduo da população é uma lista completa de alimentos para as quatro refeições diárias) e inicia o processo evolutivo multiobjetivo, empregando os operadores *fast-nondominated-sorting* e *crowding-distance* presentes (DEB; PRATAP; AGARWAL; MEYRIVAN, 2002) (OLIVEIRA; CALDEIRA; TRATTNER; MARINHO, 2018). Para que a evolução se dê, é necessário definir a quantidade ótima de cada alimento presente em cada solução candidata, pois somente com esta quantidade definida é que se pode avaliar as funções-objetivo. Essa é a tarefa desempenhada pelo Gurobi, no nível inferior da otimização binível. Ou seja, cada solução candidata proposta pelo NSGA-II deve ser fornecida ao Gurobi para que se resolva um problema de programação linear, definindo a quantidade ótima de cada alimento sem violar as condições de contorno do problema, incluindo todos os intervalos de tolerância de consumo de cada nutriente especificado. Sendo um processo de otimização binível, o *solver* Gurobi, no nível inferior, necessita de sua própria função-objetivo para definir a quantidade ótima de cada alimento, tendo sido definida a maximização da energia total. Trata-se de uma função-objetivo diferente das funções-objetivo do algoritmo NSGA-II e coerente com o princípio fundamental de qualquer dieta, que é a aquisição de energia. Já no nível superior, embora outras funções-objetivo pudessem ser consideradas para o NSGA-II, e também um maior número delas, estamos considerando aqui duas funções-objetivo conflitantes, sem perda de generalidade da proposta:

1. Custo total para se adquirir e preparar as quatro refeições diárias;
2. Grau de atendimento de um padrão de distribuição de energia e quantidade de alimentos ao longo das refeições.

Este processo se repete, geração após geração, até que um critério de parada seja atingido. Aqui definimos como critério de parada um número máximo de gerações. Por fim, o sistema entrega as soluções não-dominadas na Saída no módulo Interface, sendo que os resultados são formatados em uma lista de refeições diárias para o usuário.

O algoritmo NSGA-II requer a definição de hiperparâmetros para a realização da busca multiobjetivo. O tamanho da população e as taxas dos operadores genéticos foram definidos em valores já fundamentados na literatura sobre algoritmos evolutivos. Foram considerados 100 indivíduos para o tamanho da população e seleção por torneio de cinco indivíduos. Quanto aos operadores genéticos, empregou-se o operador de *crossover* uniforme, com 50% de chance, e o operador de mutação uniforme, com 30% de chance (MIRJALILI, 2019) (USP, 2021).

Para facilitar o armazenamento temporário de dados que devem fluir entre módulos, foi criada uma estrutura de dados denominada pacote. Ele foi concebido para proporcionar fluxos eficientes de informação entre módulos do sistema, evitando cópias e comunicações desnecessárias.

3.6. Especificação do conceito de pacote

Os dados de entrada são cruciais para a formulação completa do problema da dieta alimentar, incluindo informações do usuário, todas as restrições e condições de contorno do problema (com base na literatura ou em especificações fornecidas por especialistas em nutrição) e todas as informações acerca da composição nutricional dos alimentos.

Estruturalmente, o pacote armazena três grupos de informações: usuário, categoria alimentar e condições alimentícias. Os dois últimos grupos dependem das informações do usuário e de especialistas em nutrição, para que o sistema possa identificar quais dados devem ser carregados do banco de dados ao pacote.

- 1. Informações do Usuário:** Idade; Gênero (Sexo); Quantidade de refeições por dia; Quantidade e tipos de categorias de alimentos por refeição; Recurso disponível para custear as refeições; Intervalos de tolerância para os nutrientes e calorias; Filtros, como inclusão ou exclusão mandatória de alimentos.
- 2. Categoria Alimentar:** Quantidade de categorias de alimentos, nomes dos alimentos dentro de cada categoria; nomes dos nutrientes; valores dos nutrientes.
- 3. Condições Alimentícias:** Intervalos de tolerância e condições de contorno para os componentes da dieta alimentar.

Além disso, o pacote também já realiza a formatação dos dados de acordo com a sintaxe exigida pelos NSGA-II e Gurobi, cada qual com as suas especificidades. Esta é uma etapa esperada na viabilização da comunicação entre módulos que foram concebidos por autores distintos e para funcionalidades distintas, e que, no melhor entendimento do autor desta pesquisa, ainda não haviam sido empregados conjuntamente no contexto de dietas alimentares, sob uma perspectiva de otimização binível. É muito comum na literatura, por exemplo, o NSGA-II buscar também a quantidade ótima de cada alimento, certamente conduzindo a soluções sub-ótimas e impondo desafios enormes a qualquer meta-heurística de otimização, pela expansão gigantesca do espaço de busca, o qual já tinha uma cardinalidade desafiadora.

3.7. Caracterização de uma solução candidata

Já sabemos que existem categorias de alimentos bem consolidadas na literatura e que cada refeição deve tomar um alimento de cada uma das categorias que a compõem, sendo que é considerado aqui que uma refeição não admite mais de um alimento de uma mesma categoria. Também ficou definido no escopo deste trabalho que uma dieta se refere a um período de 24 horas, quando ocorrerão quatro refeições: café da manhã, almoço, lanche e jantar. Como são especificadas a priori as categorias de alimentos que compõem cada refeição, cuja quantidade é dada por n_{caf} , n_{alm} , n_{lan} e n_{jan} , então conclui-se que uma solução candidata vai ser um vetor de tamanho fixo, pois o número de alimentos da dieta é dado por $n_{total} = n_{caf} + n_{alm} + n_{lan} + n_{jan}$.

Fica assim bem caracterizada a natureza combinatória do problema da dieta, pois cada um dos n_{total} alimentos deve ser escolhido dentre aqueles disponíveis nas respectivas categorias de alimentos contemplados em cada refeição. Na ausência de preferências prévias ou filtros que imponham a presença ou ausência de algum alimento específico, a escolha dentro de cada categoria de alimentos deve seguir uma probabilidade uniforme.

Além disso, mesmo que se conheça toda a composição nutricional dos alimentos candidatos e se tenha objetivos e restrições bem definidos para a dieta, sem a definição das quantidades individuais de cada alimento escolhido, nada se pode afirmar acerca da qualidade de uma certa solução candidata.

Com isso, além do problema combinatório, já suficientemente desafiador, existe um problema de programação linear associado: dada a proposta de composição alimentar da dieta, qual é a quantidade ótima a ser considerada de cada alimento, respeitando as restrições e condições de contorno impostas?

Enquanto boa parte dos sistemas de recomendação para dietas alimentares da literatura, que também operam sob uma perspectiva multiobjetivo, atribuem esta tarefa ao próprio algoritmo evolutivo, no caso aqui seria o NSGA-II, em nossa metodologia este problema de programação matemática associado a cada solução candidata proposta pelo NSGA-II é resolvido pelo Gurobi, após conceber o problema da dieta como sendo de otimização binível.

É evidente que o número de refeições diárias e o número de categorias de alimentos por refeição vai depender da aplicação, sendo que os valores adotados aqui e na parte experimental deste trabalho devem servir apenas de exemplo, podendo variar arbitrariamente, de acordo com os interesses do usuário.

No exemplo a seguir, foram consideradas doze categorias de alimentos (C1 até C12) e $n_{caf} = n_{alm} = n_{lan} = n_{jan} = 3$. Também foram considerados 7 nutrientes que irão compor as condições de contorno da dieta, havendo informações deles para cada alimento das doze categorias de alimentos. A estrutura da solução candidata, a ser proposta pelo NSGA-II, é apresentada na Tabela 4. Supondo que foram escolhidos como alimentos que compõem o café da manhã Bolo Mistura (escolhido dentre as opções da Categoria C1), Bebida Láctea (escolhida dentre as opções da Categoria C2) e Jabuticaba (escolhida dentre as opções da Categoria C3), a Tabela 5 contém parte das informações que serão usadas pelo Gurobi para definir a quantidade de cada alimento que compõe a dieta, todos listados num vetor fixo de tamanho $n_{total} = 12$.

Café da Manhã			Almoço			Jantar			Lanche		
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4. Estrutura do vetor de tamanho fixo que representa uma solução candidata.

Café da Manhã					
C1	Cereal	C2	Leite	C3	Fruta
Nome	Bolo Mistura	Nome	Bebida Láctea	Nome	Jabuticaba
Energia	418 kcal	Energia	55,16 kcal	Energia	58.05 kcal
Preço	R\$ 6,16	Preço	R\$ 2,13	Preço	R\$ 0,51
Proteína	6,2 g	Proteína	1,5 g	Proteína	0.6 g
Cálcio	59 mg	Cálcio	89 mg	Cálcio	8 mg
Fibra Alimentar	1,7 mg	Fibra Alimentar	0,29 mg	Fibra Alimentar	2,3 mg
Ferro	1,12 g	Ferro	0,01 g	Ferro	0,09 g
Vitamina A	0.0 mcg	Vitamina A	0,01 mcg	Vitamina A	0.0 mcg

Fonte: Elaboração Própria. Dados NEPA, 2011.
Tabela 5. Composição da estrutura do Café da Manhã.

Uma vez especificados os alimentos dentro de cada categoria na solução candidata, para as quatro refeições (aqui está ilustrado apenas o café da manhã), o Gurobi vai usar a composição dos alimentos na definição da quantidade ótima a ser atribuída a cada alimento.

3.8. Especificação detalhada dos objetivos do NSGA-II

Serão considerados aqui dois objetivos conflitantes no NSGA-II, que devem ser atendidos simultaneamente. São eles:

1. Custo somado de aquisição e preparo de todas as refeições, a ser minimizado, definido como *Custo*;
2. Grau de seguimento de condições de referência para a distribuição de alimentos ao longo das quatro refeições, a ser maximizado, definido como *Concentração*. Este objetivo remete ao desempenho das refeições, mas é convertido para minimização ao se tomar o negativo de seu valor. A sua concepção foi parcialmente inspirada no estudo preliminar realizado por Ferreira (2017), em seu trabalho de iniciação científica.

A motivação para se tomar o *custo* total das refeições como um dos objetivos do NSGA-II é a sua adoção majoritária na literatura, já que a minimização do custo da dieta geralmente é tomada como um dos objetivos a ser otimizado (SANTOS; SICHIERI; DARMON et al., 2018) (VIEUX; MAILLOT; DREWNOWSKI, 2019) (DOOREN, 2018) (PATIL; KASTURI, 2016) (SKLAN; DARIEL, 1992) (OLIVEIRA; CALDEIRA; TRATTNER; MARINHO, 2018).

O segundo objetivo, denominado de *Concentração*, é, na verdade, um agregado de penalizações para quando a solução candidata se distancia de certas condições de equilíbrio na distribuição da energia e também da quantidade de alimentos pelas quatro refeições diárias. A motivação é evitar que uma ou mais das quatro refeições diárias tenha uma participação desprezível na dieta, ao concentrar o consumo de alimentos nas demais refeições. Hipoteticamente, seria possível atender as restrições da dieta apenas com o almoço, zerando a quantidade de alimentos nas demais refeições. Essa concentração não é desejada e este objetivo vem promover um melhor equilíbrio na distribuição dos alimentos pelas quatro refeições, tomando almoço e jantar como as refeições principais, embora este padrão possa ser prontamente redefinido de acordo com as indicações de especialistas. É intuitivo constatar que o objetivo *Concentração*, a ser devidamente formalizado a seguir, é conflitante com o objetivo *Custo*. Por exemplo, uma dieta que só contemple o almoço conduz a um tempo de preparo inferior a uma dieta que contemple as quatro refeições. Como um outro exemplo, certas categorias alimentares tendem a ser de menor custo médio que outras, e a função-objetivo *Concentração* vai penalizar uma concentração de quantidade de alimentos nas categorias de menor custo.

Evidentemente, outros objetivos e mais que dois objetivos conflitantes poderiam ser considerados, mantendo intactas as demais etapas da metodologia, embora com algum impacto no custo da busca, no caso de mais de dois objetivos.

Para cada solução candidata, devem ser avaliadas as duas funções-objetivo, de forma a posicioná-la no espaço dos objetivos. Para que seja possível avaliar qualquer das funções-objetivo, é necessário definir não apenas os alimentos que compõem a dieta (informação fornecida pelo NSGA-II), mas a quantidade de cada alimento (informação fornecida pelo Gurobi).

A fórmula da primeira função-objetivo é uma soma das quantidades de cada alimento multiplicado pelo seu custo (de aquisição e preparo), apresentado na Equação 6. A fórmula da segunda função-objetivo é uma soma de quatro termos: *distribuição de energia* (dE), *distribuição de peso* (dP), *distribuição de quantidade* (dQ) e *nota do peso* (nP) (Equação 7).

A *distribuição de energia* (dE) (Equação 8) e a *distribuição de peso* (dP) (Equação 9) são associadas a condições de referência para a distribuição de energia adquirida e quantidade de alimentos consumida ao longo das refeições, conforme informado na Tabela 6. Essas condições de referência foram inicialmente propostas em Ferreira (2017). Como já mencionado, a motivação está no fato de se buscarem dietas que não concentram energia adquirida e quantidade de alimentos em uma ou duas refeições dentre as quatro do dia. Se a refeição atender a referência, ela recebe um valor de 1 ponto, recebendo 0 caso contrário. Após avaliar todas as refeições, somam-se os pontos das refeições e divide-se pela quantidade total de refeições a fim de ter uma nota final no intervalo entre 0 e 1. Evidentemente, essas condições de referência da Tabela 6 podem ser ajustadas pelo especialista, de acordo com as demandas da aplicação.

Refeições	Distribuição de Energia (relativo à Energia Total)	Distribuição de Peso
Café da Manhã (Caf)	$15\% \leq energia_{caf} \leq 35\%$	$300g \leq quantidade_{caf} \leq 500g$
Almoço (Alm)	$15\% \leq energia_{alm} \leq 40\%$	$400g \leq quantidade_{alm} \leq 600g$
Jantar (Jan)	$15\% \leq energia_{jan} \leq 40\%$	$400 \leq quantidade_{jan} \leq 600g$
Lanche (Lan)	$5\% \leq energia_{lan} \leq 15\%$	$300g \leq quantidade_{lan} \leq 500g$

Fonte:Elaboração Própria.

Tabela 6: Condições de referência para a distribuição de energia adquirida e quantidade de alimentos consumida ao longo das quatro refeições diárias.

O terceiro cálculo, *distribuição de quantidade* (dQ), é a média quantidade de alimentos de fato considerados pelo Gurobi, para cada solução candidata (Equação 10). Ou seja, soma-se um ponto para cada alimento que aparecer com quantidade maior ou igual a 1 unidade (geralmente equivalente a uma porção de 100 gramas), dividindo-se pelo total de alimentos que compõem a solução-candidata a fim de ter uma nota final no intervalo entre 0 e 1. Quanto menos alimentos o Gurobi aproveitar, dentre aqueles que compõem a solução candidata, menor será a nota de *distribuição de alimentos*.

Por fim, o quarto cálculo, *nota de peso* (nP), é uma função também heurística formada por uma função linear por partes, a qual foi inspirada na forma como regras fuzzy são ativadas (Equação 11) (CAVALLARO, 2015). A nota varia entre -1 e +1, sendo +1 quando o peso total dos alimentos de todas as refeições fica entre 900 g e 2100 g, considerada uma faixa normal. Para valores abaixo e acima deste intervalo, a nota sofre uma queda linear, sendo mais acentuada para valores abaixo de 900 g. Percebe-se que este cálculo pode resultar num valor negativo; ou seja, a avaliação do peso da composição pode penalizar o valor final da função-objetivo. Repare que esta heurística também pode ser editada pelo usuário, sendo possível redefinir todo o seu comportamento.

A fórmula matemática da segunda função-objetivo com os quatro termos é apresentada na Equação 7, sendo que as fórmulas de cada termo individual são apresentadas na sequência. Percebe-se que este objetivo, após todas as somas das notas, é convertido para um valor negativo, pois deseja-se minimizar este objetivo na busca das soluções do NSGA-II (DEB; PRATAP; AGARWAL; MEYRIVAN, 2002) (OLIVEIRA; CALDEIRA; TRATTNER; MARINHO, 2018). A Figura 9 ilustra o comportamento do termo *peso*, conforme já descrito textualmente.

$$Custo = n_{caf} custo_{caf} + n_{alm} custo_{alm} + n_{jan} custo_{jan} + n_{lan} custo_{lan} \quad (6)$$

$$Concentração = -1 (dE + dP + dQ + nP) \quad (7)$$

$$dE = \frac{eCaf + eAlm + eJan + eLan}{total\ de\ refeicao}$$

s.t.

$$eCaf = \begin{cases} 1, & \text{se } 15\% \leq \frac{energia_{caf}}{energia\ total} 100\% \leq 35\% \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$eAlm = \begin{cases} 1, & \text{se } 15\% \leq \frac{energia_{alm}}{energia\ total} 100\% \leq 40\% \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$eJan = \begin{cases} 1, & \text{se } 15\% \leq \frac{energia_{jan}}{energia\ total} 100\% \leq 40\% \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$eLan = \begin{cases} 1, & \text{se } 5\% \leq \frac{energia_{lan}}{energia\ total} 100\% \leq 15\% \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (8)$$

$$dP = \frac{pCaf + pAlm + pJan + pLan}{total\ de\ refeicao}$$

s.t.

$$pCaf = \begin{cases} 1, & \text{se } 300g \leq quantidade_{caf} \leq 500g \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$pAlf = \begin{cases} 1, & \text{se } 400g \leq quantidade_{lan} \leq 600g \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$pJan = \begin{cases} 1, & \text{se } 400g \leq quantidade_{jan} \leq 600g \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

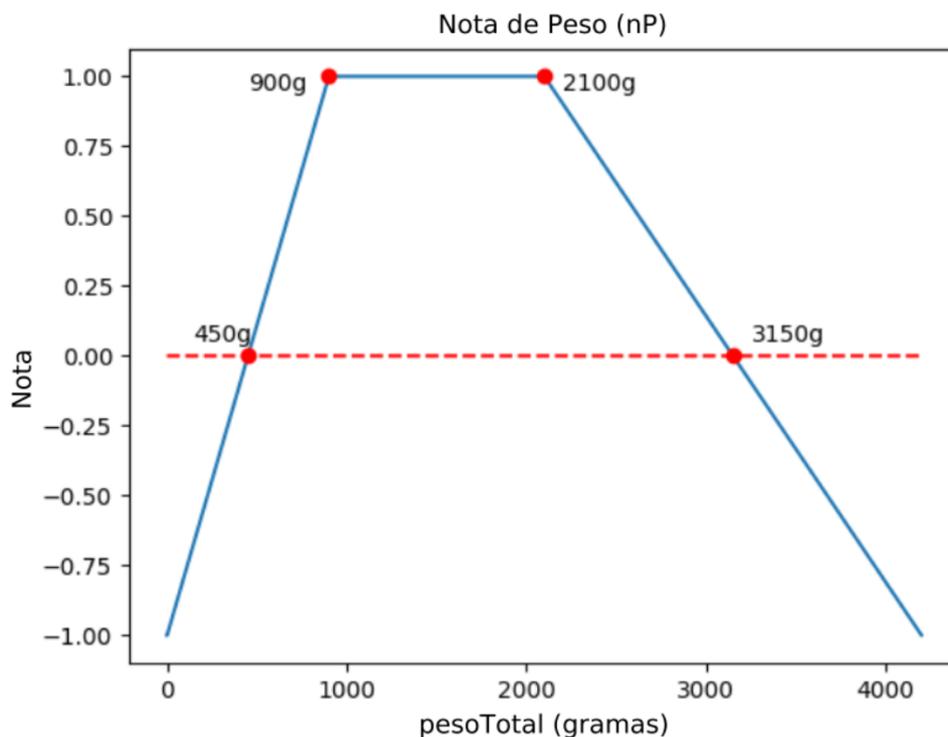
$$pLan = \begin{cases} 1, & \text{se } 300g \leq quantidade_{lan} \leq 500g \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (9)$$

$$dQ = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n qtdUnitaria(quantidade_{x_i})$$

s.t.

$$qtdUnitaria(quantidade_{x_i}) = \begin{cases} 1, & \text{se } quantidade_{x_i} \geq 1 \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 nP &= \text{nota}, \text{ onde } -1 \leq \text{nota} \leq 1 \\
 \text{s.t.} \\
 \text{pesoTotal} &= \text{peso}_{caf} + \text{peso}_{alm} + \text{peso}_{jan} + \text{peso}_{lan} \\
 \text{nota} &= \begin{cases} -1, & \text{se } \text{pesoTotal} \leq 0g \\ -\left(\frac{450 - \text{pesoTotal}}{450}\right), & \text{se } 0g < \text{pesoTotal} < 450g \\ \frac{\text{pesoTotal} - 450}{450}, & \text{se } 450g < \text{pesoTotal} < 900g \\ 1, & \text{se } 900g \leq \text{pesoTotal} \leq 2100g \\ \frac{3150 - \text{pesoTotal}}{1050}, & \text{se } 1500g < \text{pesoTotal} \leq 3150g \\ -\left(\frac{\text{pesoTotal} - 3150}{1050}\right), & \text{se } 3150g < \text{pesoTotal} < 4200g \\ -1, & \text{se } \text{pesoTotal} \geq 4200g \end{cases} \quad (11)
 \end{aligned}$$



Fonte: Ilustração própria.

Figura 9. Comportamento do termo *nota de peso (nP)*, que é uma função linear por partes, penalizando a nota para casos em que o peso total dos alimentos consumidos ao longo das quatro refeições fica abaixo de 900 g e acima de 2100 g.

3.9. Papel desempenhado pelo NSGA-II e pelo Gurobi

Com base na estruturação de uma solução candidata e tomando uma formulação adequada para o problema de programação matemática associado à dieta alimentar do usuário, o algoritmo evolutivo multiobjetivo inicia seu processo de busca heurística visando encontrar as soluções eficientes do problema através dos dois objetivos (custo total e concentração). O algoritmo evolutivo cria os indivíduos para definir a população inicial (P_t). A população (P_t) tem uma quantidade pré-definida de soluções candidatas e os indivíduos são formulados aleatoriamente na geração inicial. Tendo uma população inicial pronta, o algoritmo aplica os operadores de *mutação uniforme* e *crossover uniforme* para criar novas soluções candidatas Q_t . Após a aplicação das operações de *fast-nondominated-sorting* e de *crowding distance* sobre $P_t + Q_t$, chega-se à próxima geração de soluções candidatas, fechando assim um ciclo do processo evolutivo multiobjetivo (veja Figura 10) (DEB; PRATAP; AGARWAL; MEYRIVAN, 2002). A ideia é ir aproximando as soluções candidatas da fronteira de Pareto e também ir espalhando uniformemente (tanto quanto possível) as soluções candidatas ao longo da fronteira de Pareto. As probabilidades de ocorrência de *crossover uniforme* e *mutação uniforme* são 50% e 30%, respectivamente. Por hora, o elitismo não está sendo adotado.

Como seus nomes indicam, os operadores genéticos adotados aqui, *crossover uniforme* e *mutação uniforme*, não impõem preferências ou tendências na hora de combinar duas soluções candidatas ou perturbar uma solução candidata. De fato, na abordagem desta pesquisa, não há preferência a nenhum alimento dentro de cada categoria, assim como não há preferência por nenhuma combinação de alimentos numa mesma refeição.

As duas funções-objetivo do NSGA-II (nível superior da otimização binível) são avaliadas para cada solução candidata da população na geração atual. Para tanto, o Gurobi é chamado para atribuir a quantidade ótima de cada alimento, resolvendo o problema de programação linear da dieta alimentar, com todas as restrições e condições de contorno definidas pelo usuário e tendo como função-objetivo a maximização da energia total da dieta alimentar (nível inferior da otimização binível). Como o Gurobi tem acesso a todas as informações sobre os alimentos, ele também devolve a avaliação das duas funções-objetivo do NSGA-II,

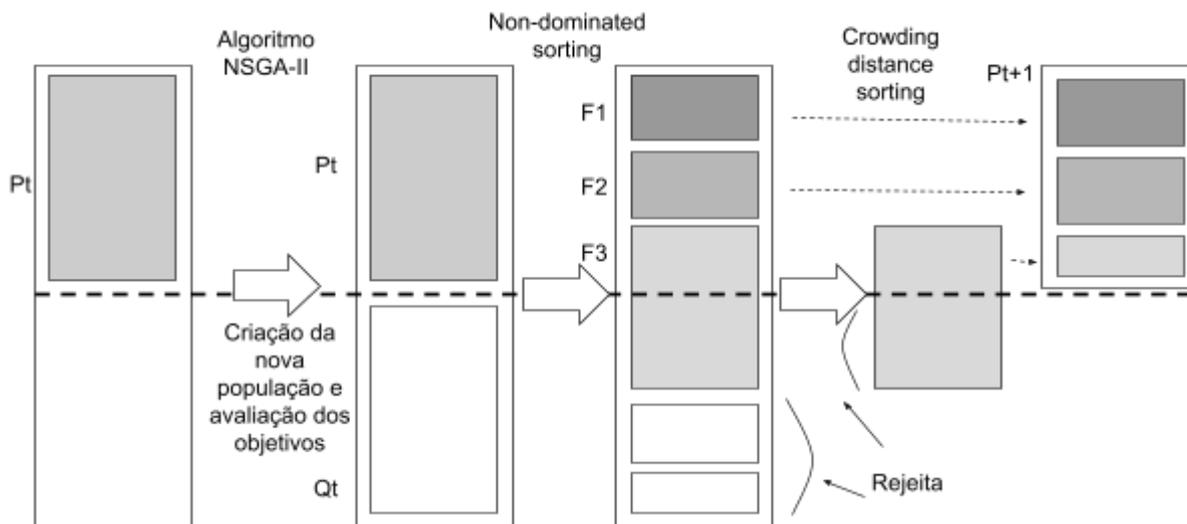
permitindo que o NSGA-II dê sequência ao processo evolutivo multiobjetivo, após o retorno do Gurobi.

A equação a seguir apresenta a formulação matemática do Gurobi. A formulação da função objetivo $Max_{alimento, energia}$ é a soma da energia fornecida por cada alimento da dieta, considerando o produto da energia por unidade pela quantidade do respectivo alimento. As restrições são também formuladas por uma combinação linear envolvendo a quantidade de cada alimento. Além de algumas condições de contorno associadas à própria formulação da dieta, as restrições geralmente estão associadas a valores máximos e mínimos de nutrientes e calorias. Sendo assim, $alimento_i$, $1 \leq i \leq N$, são as variáveis de decisão (quantidade de cada alimento presente na solução candidata provinda do NSGA-II) e cada coeficiente c_{jn} , $1 \leq j \leq M$ e $1 \leq n \leq N$ se refere à concentração, por unidade, do nutriente j no n -ésimo alimento, ou qualquer outra variável que deve atender a algum intervalo de tolerância. Filtros, por exemplo, impedindo ou forçando a inclusão de certos alimentos podem ser definidos aqui, como restrições adicionais.

$$Max_{alimentos, energia}: objetivo = \sum_{i=1}^N alimento_i energia_i \quad (12)$$

s.t

$$\begin{aligned} calcio_1 alimento_1 + calcio_2 alimento_2 + \dots + calcio_N alimento_N &\geq calcio_{min} \\ calcio_1 alimento_1 + calcio_2 alimento_2 + \dots + calcio_N alimento_N &\leq calcio_{max} \\ proteina_1 alimento_1 + proteina_2 alimento_2 + \dots + proteina_N alimento_N &\geq proteina_{min} \\ proteina_1 alimento_1 + proteina_2 alimento_2 + \dots + proteina_N alimento_N &\leq proteina_{max} \\ sodio_1 alimento_1 + sodio_2 alimento_2 + \dots + sodio_N alimento_N &\geq sodio_{min} \\ sodio_1 alimento_1 + sodio_2 alimento_2 + \dots + sodio_N alimento_N &\leq sodio_{max} \\ fibra_1 alimento_1 + fibra_2 alimento_2 + \dots + fibra_N alimento_N &\geq fibra_{alimentar_{min}} \\ fibra_1 alimento_1 + fibra_2 alimento_2 + \dots + fibra_N alimento_N &\leq fibra_{alimentar_{max}} \\ ferro_1 alimento_1 + ferro_2 alimento_2 + \dots + ferro_N alimento_N &\geq ferro_{min} \\ ferro_1 alimento_1 + ferro_2 alimento_2 + \dots + ferro_N alimento_N &\leq ferro_{max} \\ vitaminaA_1 alimento_1 + vitaminaA_2 alimento_2 + \dots + vitaminaA_N alimento_N &\geq vitaminaA_{min} \\ vitaminaA_1 alimento_1 + vitaminaA_2 alimento_2 + \dots + vitaminaA_N alimento_N &\leq vitaminaA_{max} \end{aligned} \quad (13)$$



Fonte: Elaboração própria.

Figura 10. Processo evolutivo multiobjetivo do NSGA-II.

Apenas como um exemplo ilustrativo, a Tabela 7 apresenta um resultado encontrado pelo Gurobi.

Variável	Quantidade (1 unidade = 100g)	Energia (kca)	Preço (R\$ por 100g)
Solução Candidata	43	6670,82	R\$566,27
Pão de Trigo Forma Integral	1	253,19	R\$7,59
Bebida Láctea com Pêssego	7	55,16	R\$5,50
Abacate	17	96,10	R\$5,28
Arroz Integral Cozido	7	123,53	R\$5,28
Abóbora Cabotian Cozida	1	48,04	R\$2,53
Apresuntado	1	128,86	R\$6,71
Suco de Laranja Lima	1	39,34	R\$1,43
Amendoim	4	554,05	R\$6,05
Abadejo Filé Assado	1	111,62	R\$0,44
Abóbora Cabotian Cozida	1	48,04	R\$2,53
Azeite de Dendê	1	884,00	R\$6,38
Abacate	1	96,15	R\$5,28

Fonte: Elaboração própria

Tabela 7. Exemplo de Resultado do Gurobi.

Na Figura 10, que apresenta os principais passos do NSGA-II, cada indivíduo (solução candidata) que compõe a população P_t é um vetor de tamanho fixo com uma lista de alimentos de diferentes categorias alimentares, incluindo todas as refeições do dia. Está implícito na figura a chamada ao Gurobi, que define a quantidade ótima de cada alimento para todas as soluções candidatas de P_t , além de também avalia as duas funções-objetivo do problema da dieta, para todas as soluções candidatas.

Caso a formulação fosse mono-objetivo, é sabido que, usando variáveis de decisão binárias adicionais e outras condições de contorno, o Gurobi sozinho poderia dar conta de definir a lista ótima de alimentos. Mas, para tanto, seria necessário alterar a função-objetivo do Gurobi para uma combinação convexa dos objetivos originais do problema da dieta (Gurobi, 2021). O problema da dieta se converteria então num problema de programação linear-inteira mista. Haveria perda de desempenho em dois aspectos:

1. A escalarização das duas funções-objetivos não garante uma boa distribuição de soluções ao longo da fronteira de Pareto;
2. A maximização da energia total, que é atualmente o foco do Gurobi, seria descartada ou teria que ser adicionada como um terceiro objetivo na escalarização.

O Gurobi tem recursos para lidar com múltiplos objetivos (Gurobi, 2021), mas não sob a perspectiva de povoar uma fronteira de Pareto e gerar diversidade de soluções candidatas, a partir de diferentes *trade-offs* entre os objetivos. O que o Gurobi pode fazer é combinar vários objetivos de um problema de forma hierárquica, definindo uma ordem de prioridade para os múltiplos objetivos e otimizando de acordo com a ordem estabelecida. Priorizar objetivos em sequência não é compatível com o tipo de problema aqui formulado para a dieta alimentar.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. Resultados experimentais sem alimentos fixos

O sistema de recomendação multiobjetivo para dietas alimentares foi implementado sob uma perspectiva de otimização binível, com o apoio dos *solvers* NSGA-II e Gurobi. Alguns resultados são exibidos a seguir, correspondendo a soluções factíveis que apresentam compromissos distintos entre os dois objetivos de nível superior: *custo* total dos alimentos e organização da distribuição dos alimentos nas refeições, denominada *concentração*. No nível inferior, o Gurobi trabalha com a maximização da energia total da dieta.

Como já definido em seções anteriores, o vetor que representa uma solução candidata é montado para ter 4 grupos de refeições com 15 tipos de categorias de alimentos (ver Tabela 8). As restrições impostas ao problema da dieta contemplam 7 nutrientes, além de energia e custo (energia e custo são funções-objetivo no nível superior, mas restrições no nível inferior), totalizando 9 elementos para restrições. Porém, o sistema trabalha com restrições máximas e mínimas, o que conduz a um total de 18 tipos de restrições. Neste caso de estudo específico, o usuário final é um homem com idade de 25 anos (qualquer outro perfil de usuário poderia ser considerado). Logo, as restrições ativadas pelo banco de dados são do grupo [homem entre 18 e 30 anos de idade]. Os hiperparâmetros do NSGA-II são:

- Tamanho da população: 100
- Número de gerações: 10
- Probabilidade de crossover: 50%
 - Operador de Crossover Uniforme
- Probabilidade de mutação: 30%.
 - Operador de Mutação Uniforme
- Método de Seleção Por Torneio
 - Torneio de 5 participantes
 - Chance de vitória do participante mais forte: 90%

Composição do Vetor Unitário	
Refeição	Composição
Café da Manhã (Caf)	Três Categorias: Cereais, Leites, Frutas
Almoço (Alm)	Cinco Categorias: Cereais, Leguminosas, Verduras, Carnes, Ovos
Jantar (Jan)	Quatro Categorias: Bebidas, Verduras, Pescados, Leites
Lanche (Lan)	Três Alimentos: Verduras, Leites, Frutas
Restrições de Nutrientes Selecionadas	
[Energia, Preço, Proteína, Cálcio, Sódio, Fibra Alimentar, Ferro, Vitamina A]	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 8. Composição da dieta em categorias de alimentos.

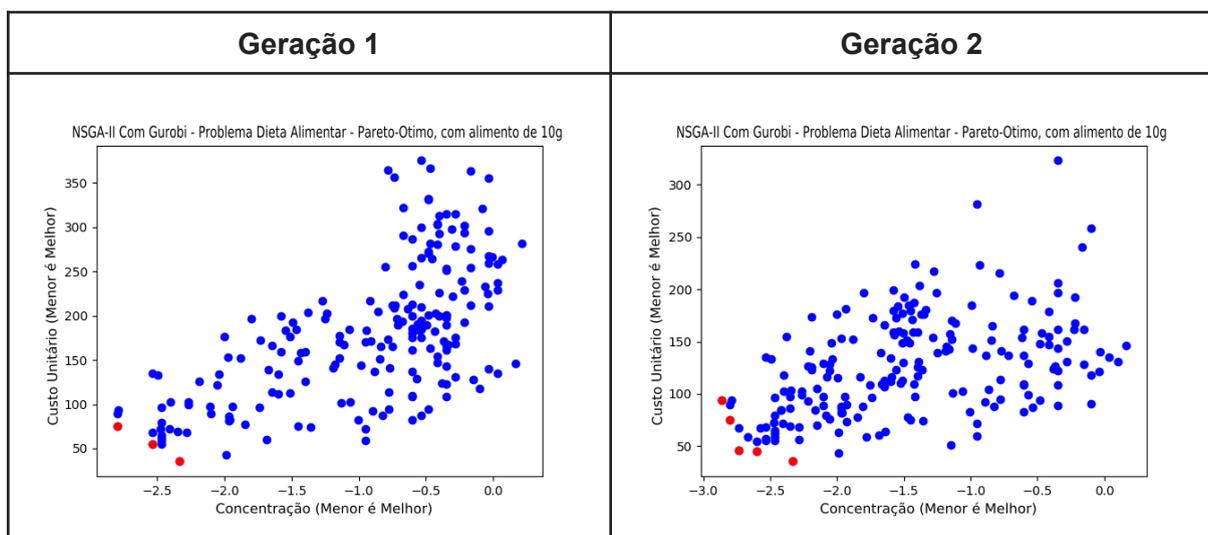
Houve também a necessidade de alguns ajustes de funcionalidades do sistema, como alteração da porção padrão de comida de 100 gramas para 10 gramas. Esta maior granularidade está diretamente relacionada à quantidade pré-especificada de itens alimentares diários da dieta, em número de 15. Fica evidente que uma porção mínima de 100 gramas imporia restrições fortes, com muitos itens alimentares sendo adotados com 0 ou 1 porção. Já com cada porção sendo de 10 gramas, há uma grande flexibilização na quantidade de porções por item alimentar. O aspecto potencialmente negativo desta maior granularidade está em admitir porções muito pequenas para itens alimentares específicos. É certo que a quantidade em gramas de uma porção padrão pode ser revista a qualquer momento, pelo usuário, sendo apenas um hiperparâmetro da técnica.

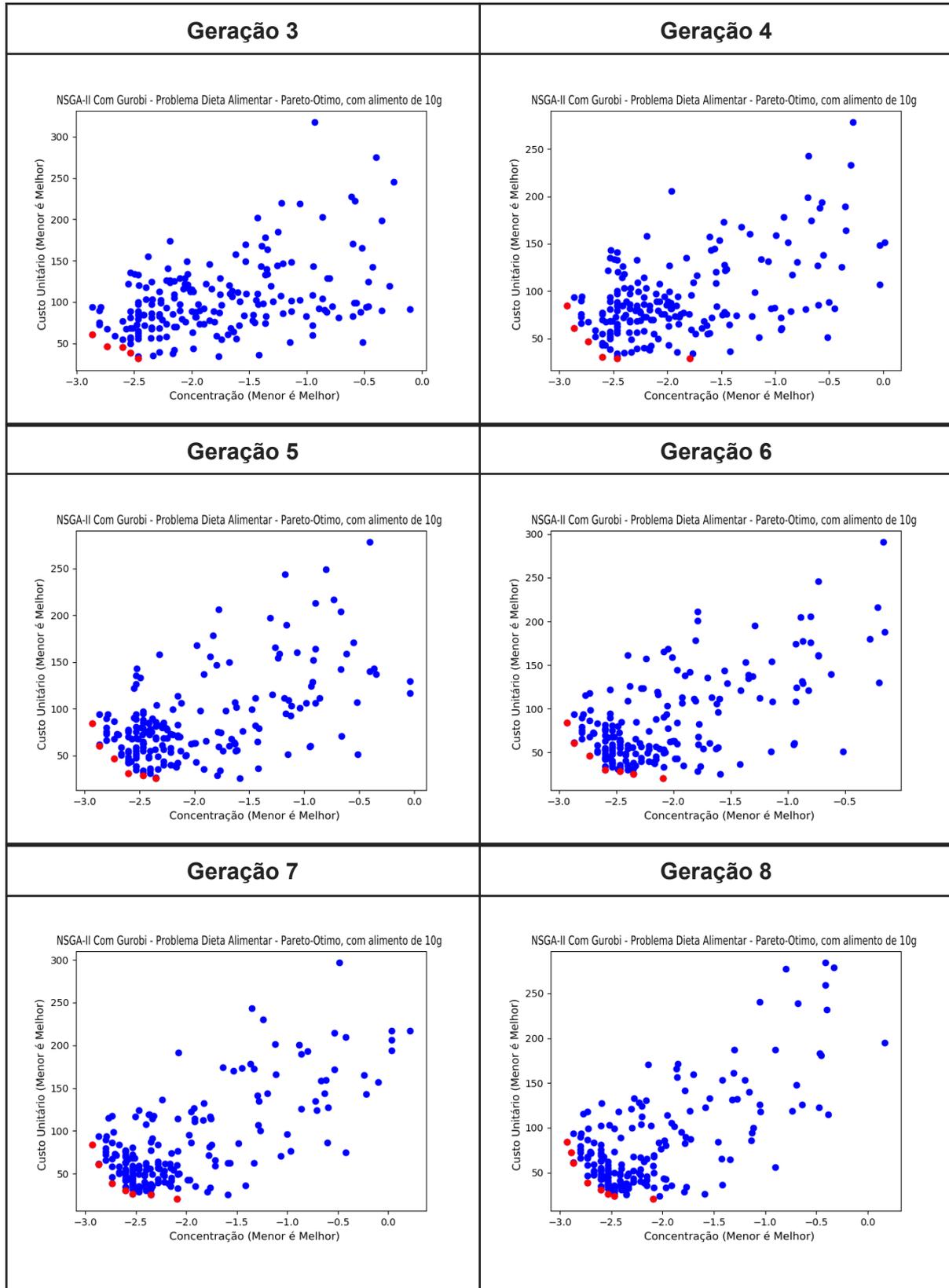
Além deste ajuste, implementaram-se valores mínimos e máximos para as condições Energia e Preço:

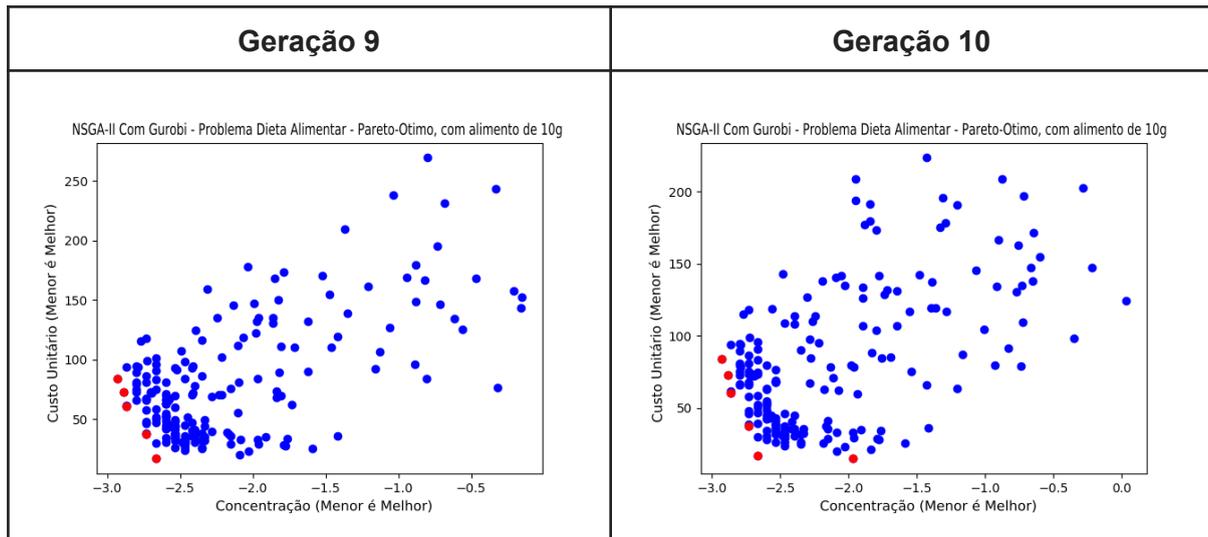
- Energia:
 - Mínimo: 2000 kcal
 - Máximo: 6000 kcal
- Preço:
 - Mínimo: R\$10,00
 - Máximo: R\$500,00

O programa completo foi executado num notebook com sistema operacional Ubuntu 20.04 GNU-Linux de 64 bits e 16GB de RAM. Requereu-se aproximadamente dois minutos, o que garante uma boa escalabilidade para o sistema como um todo. Por estar numa fase de protótipo, o sistema escreve muitas informações no terminal, com resultados intermediários, operações que, caso ausentes, poderiam deixar a execução ainda mais rápida.

As definições dos hiperparâmetros, inicialmente, foram inspirados na literatura e, ao longo dos testes, foram sendo alterados visando um melhor trabalho do sistema. Percebeu-se que o par NSGA-II e Gurobi exhibe progressos mais acentuados até atingir a sétima ou oitava geração do processo evolutivo de busca. Como esperado, as primeiras gerações mostram uma evolução mais acentuada das soluções candidatas, de acordo com os objetivos da busca. Assim, uma evolução da população até 10 épocas fornece um fôlego necessário para que a busca progrida e tenda a atingir um estágio evolutivo mais próximo da convergência da busca. A Tabela 9 contém a evolução das soluções candidatas dentro do espaço de busca com os mesmos hiperparâmetros apresentados.



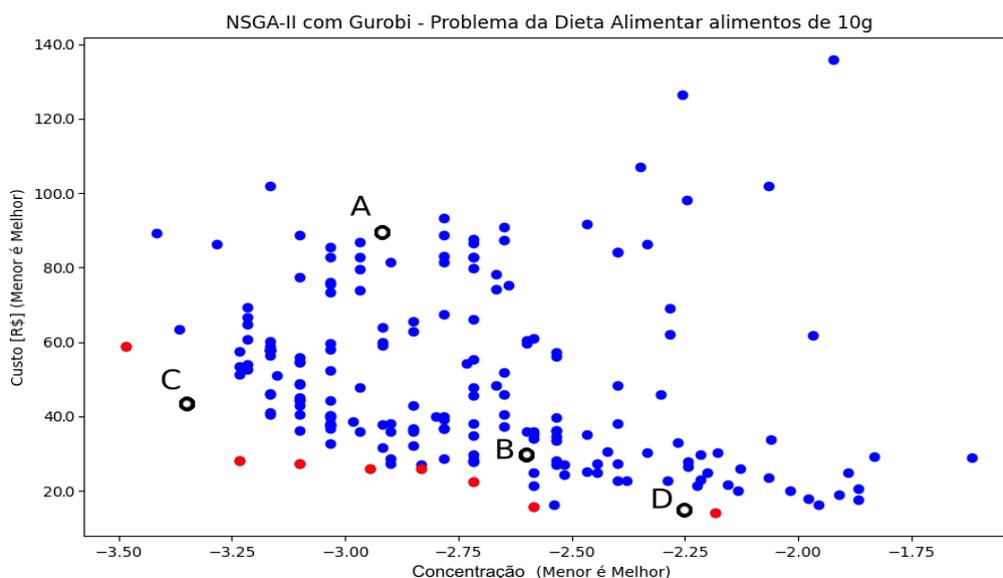




Fonte: Elaboração Própria

Tabela 9: Evolução das Soluções Candidatas ao longo de 10 gerações.

A Figura 11 apresenta o resultado da busca ao final do processo de otimização multiobjetivo binível, em que os pontos vermelhos são as soluções não-dominadas (mais próximas da fronteira de Pareto), enquanto os pontos azuis são as soluções dominadas. A Tabela 10 contém os objetivos das quatro soluções encontradas pelo sistema e destacadas na Figura 11, enquanto a Tabela 11 tem as características destas soluções. As duas primeiras (A e B) são soluções dominadas, e as duas últimas (C e D) são soluções não-dominadas.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 11. Espaço de objetivos (Custo X Concentração) com as soluções candidatas do Problema da Dieta Alimentar (quanto menor os valores dos objetivos, melhor).

Soluções Candidatas		Objetivos de NSGA-II		Objetivo de Gurobi
		Preço (R\$)	Concentração	Energia (kcal)
Soluções Dominadas	A	86,94	-2.96	3900
	B	30,77	-2.65	3707
Soluções Não Dominadas	C	43,82	-3.35	2133
	D	15,18	-2.25	2031,38

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 10. Objetivos das quatro soluções candidatas destacadas na Figura 11.

Soluções Dominadas					
Soluções Candidatas		Refeição	Quantidade (x10g)	Energia (kcal)	Preço (R\$)
A	Arroz Integral	Café da Manhã	1	12,35	0,53
	Bebida Láctea de Pêssego		2	6,95	0,04
	Abacate		60	9,62	0,53
	Arroz Integral	Almoço	1	12,35	0,53
	Amendoim		1	54,40	0,60
	Farofa de Mandioca		1	40,51	0,25
	Carne Bovina		1	19,55	0,08
	Omelete de Queijo		52	26,80	0,19
	Suco de Caju	Jantar	42	4,51	0,63
	Amendoim		14	54,40	0,60
	Abadejo Filé		1	11,16	0,04
	Amêndoa Torrada		3	58,10	0,53
	Abóbora Cabotian	Lanche	1	4,80	0,26
	Óleo de Babaçu		6	88,40	0,87
	Abacate		1	9,62	0,53

Soluções Candidatas		Refeição	Quantidade (x10g)	Energia (kcal)	Preço (R\$)
B	Arroz Integral	Café da Manhã	1	12,35	0,53
	Bebida Láctea de Pêssego		1	5,51	0,55
	Açaí com Xarope de Guaraná		49	11,03	0,01
	Arroz Integral	Almoço	1	12,35	0,52
	Amendoim		1	54,40	0,60
	Abóbora Cabotian		1	4,80	0,25
	Apresentado		2	12,88	0,67
	Omelete de Queijo		51	26,80	0,18
	Suco de Uva	Jantar	1	5,76	0,32
	Amendoim		19	54,40	0,60
	Filé de Abadejo		3	11,16	0,04
	Amêndoa Torrada		1	58,10	0,53
	Abóbora	Lanche	1	4,80	0,25
	Azeite (Óleo)		6	88,40	0,64
	Figo Enlatado		1	18,43	0,85
Soluções Não Dominadas					
Soluções Candidatas		Refeição	Quantidade (x10g)	Energia (kcal)	Preço (R\$)
C	Arroz Integral	Café da Manhã	1	12,35	0,53
	Queijo Pasteurizado		23	25,66	0,06
	Caqui		20	7,13	0,18
	Curau de Milho	Almoço	1	40,23	0,81
	Amendoim		3	54,40	0,60
	Acelga		37	2,09	0,36
	Apresentado		1	12,89	0,67
	Omelete de Queijo		2	26,80	0,19

	Suco de Cajú	Jantar	3	4,51	0,63
	Amendoim		1	54,40	0,60
	Abadejo Filé		1	11,16	0,04
	Castanha do Brasil		10	64,30	0,56
	Abóbora Cabotian	Lanche	32	4,80	0,26
	Azeite (Óleo)		1	88,40	0,64
	Abacate		8	9,62	0,53
Soluções Candidatas		Refeição	Quantidade (x10g)	Energia (kcal)	Preço (R\$)
D	Arroz Integral	Café da Manhã	6	12,35	0,53
	Queijo Pasteurizado		24	25,66	0,06
	Maçã		1	5,55	0,23
	Arroz Integral	Almoço	1	12,35	0,53
	Tremoço		19	38,13	0,09
	Mandioca		3	15,14	0,03
	Apresuntado		1	12,89	0,67
	Ovo Cozido de Galinha		1	14,57	0,80
	Suco de Caju	Jantar	1	4,51	0,63
	Amendoim		3	54,40	0,60
	Abadejo Filé		1	11,16	0,04
	Amêndoa		1	58,10	0,53
	Abóbora Cabotian	Lanche	3	4,80	0,26
	Azeite (Óleo)		3	88,40	0,74
	Abacate		1	9,62	0,53

Fonte: Elaboração própria

Tabela 11. Soluções candidatas destacadas na Figura 11.

Observa-se que o trabalho conjunto de dois algoritmos na otimização binível produziu soluções não-dominadas factíveis e que aproximam bem a fronteira de Pareto, além de exibirem múltiplos *trade-offs* entre os dois objetivos. Os dois objetivos são de fato conflitantes, caracterizando bem uma fronteira de Pareto que estabelece diferentes *trade-offs* entre ambos.

Outra constatação relevante ao se analisar esses resultados é o efeito causado pela ausência de uma especificação mais concordante com os hábitos alimentares brasileiros. As soluções A, B, C e D colocaram Arroz Cozido no Café da Manhã. Evidente que existem pessoas que gostam de comer arroz nesta refeição, mas não é habitual. O sistema foi projetado para admitir a inclusão de filtros que forcem a ocorrência ou impedem a participação de alimentos específicos em refeições específicas, o que, no entanto, não foi trabalhado neste caso de estudo. Logo, qualquer alimento dentro de uma categoria de alimentos que está presente em uma certa refeição pode ser escolhido com igual probabilidade durante a busca.

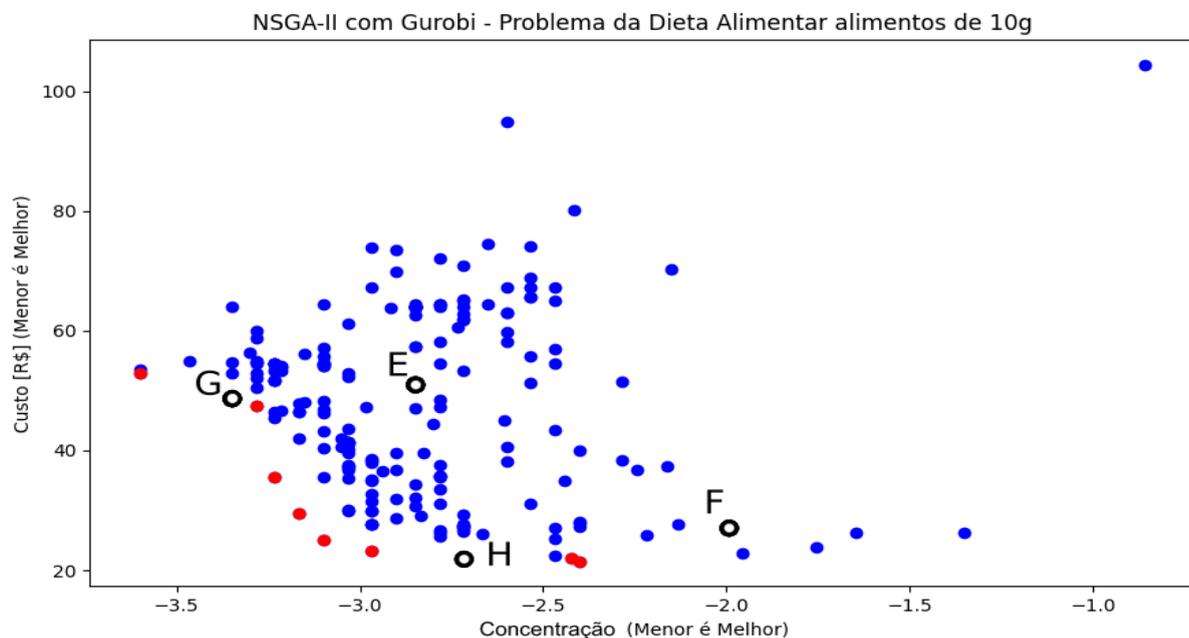
4.2. Resultados experimentais com alimentos fixos

Um filtro que impõe a presença de certos alimentos em certas refeições é trabalhado neste caso de estudo. A operação é simples: através da interface disponível, o usuário define qual alimento deseja ver presente sempre em qual refeição e a busca vai contemplar este cenário, ou seja, que considera a presença obrigatória do(s) alimento(s) escolhido(s). Aplicou-se então o seguinte filtro: no Café da Manhã, deseja-se ter Pão de Trigo Integral, e no jantar, suco de Laranja Lima. Logo, a solução candidata tem dois alimentos fixos que não podem ser alterados, mas tem dez alimentos a serem trabalhados durante a otimização multiobjetivo binível (veja Tabela 12). Os resultados destas soluções podem ser vistos na Tabela 13 e Tabela 14, que contém quatro soluções encontradas pelo sistema. As duas primeiras (A e B) são soluções dominadas, e as duas últimas (C e D) são soluções não-dominadas. Estes quatro pontos estão ilustrados na Figura 12, que envolve o espaço de objetivos.

Café da Manhã			Almoço					Jantar				Lanche		
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
Pão Trigo Integral	?	?	?	?	?	?	?	Suco de Laranja Lima	?	?	?	?	?	?

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 12. Apresentação da Solução Candidata filtrada pelo usuário, com 12 categorias (C1 a C12), mas em que há dois alimentos pré-selecionados.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 12. Espaço de objetivos (Custo X Concentração) com as soluções candidatas do Problema da Dieta Alimentar, mas desta vez impondo um filtro com alimentos fixos (quanto menor os valores dos objetivos, melhor).

Soluções Candidatas		Objetivos de NSGA-II		Objetivo de Gurobi
		Preço (R\$)	Concentração	Energia (kcal)
Soluções Dominadas	E	56,10	-2.85	3210
	F	26,79	-1.99	2444
Soluções Não Dominadas	G	47,64	-3.35	3070
	H	22,07	-2.71	2005

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 13. Objetivos das quatro soluções candidatas destacadas na Figura 12.

Soluções Dominadas					
Soluções Candidatas		Refeição	Quantidade (x10g)	Energia (kcal)	Preço (R\$)
E	Pão Trigo Integral	Café da Manhã	2	25,32	0,76
	Queijo de Minas		2	32,07	0,69
	Abacate		39	9,61	0,52
	Arroz Integral	Almoço	1	12,35	0,52
	Amendoim		1	54,40	0,60
	Abóbora Cabotian		1	4,80	0,25
	Apresuntado		3	12,88	0,67
	Omelete de Queijo		44	26,80	0,18
	Suco de Laranja Lima	Jantar	64	3,93	0,14
	Amendoim		12	54,40	0,60
	Filé de Abadejo		1	11,16	0,04
	Amêndoa		1	58,10	0,53
	Abóbora Cabotian	Lanche	5	4,80	0,25
	Azeite de Dendê		5	88,40	0,63
	Abacate		1	9,61	0,52
Soluções Candidatas		Refeição	Quantidade (x10g)	Energia (kcal)	Preço (R\$)
F	Pão de Trigo Integral	Café da Manhã	7	25,31	0,76
	Queijo de Minas		4	32,07	0,69
	Pinha		7	8,84	0,04
	Arroz Integral	Almoço	1	12,35	0,52
	Amendoim		1	54,40	0,60
	Abóbora Cabotian		1	4,80	0,25
	Apresuntado		1	12,88	0,67
	Omelete de Queijo		33	26,80	0,18

	Suco de Laranja Lima	Jantar	1	3,93	0,14
	Pé de Moleque		13	50,32	0,47
	Filé de Abadejo		2	11,16	0,04
	Amêndoa		1	58,10	0,53
	Abóbora Cabotian	Lanche	1	4,80	0,25
	Margarina		6	59,31	0,47
	Abacate		1	9,61	0,52
Soluções Não Dominadas					
	Soluções Candidatas	Refeição	Quantidade (x10g)	Energia (kcal)	Preço (R\$)
G	Pão Trigo Integral	Café da Manhã	1	25,31	0,76
	Queijo Pasteurizado		6	30,31	0,06
	Pinha		29	8,84	0,04
	Arroz Integral	Almoço	2	12,35	0,52
	Amendoim		1	54,40	0,60
	Abóbora Cabotian		1	4,80	0,25
	Carne: Lagarto Bovino		1	13,49	0,14
	Omelete de Queijo		42	26,80	0,18
	Suco de Laranja Lima	Jantar	5	3,93	0,14
	Amendoim		1	54,40	0,60
	Filé de Abadejo		1	11,16	0,04
	Coco		21	40,60	0,89
	Abóbora Cabotian	Lanche	8	4,80	0,25
	Azeite de Dendê		2	88,40	0,63
	Abacate		24	9,61	0,52

Soluções Candidatas		Refeição	Quantidade (x10g)	Energia (kcal)	Preço (R\$)
H	Pão Trigo Integral	Café da Manhã	1	25,32	0,76
	Leite Integral		7	49,66	0,74
	Pêssego		2	6,31	0,70
	Macarrão	Almoço	1	37,06	0,48
	Feijão Carioca		1	32,90	0,28
	Mandioca		8	30,01	0,14
	Mortadela		7	26,88	0,13
	Omelete de Queijo		10	26,80	0,18
	Suco de Laranja Lima	Jantar	1	3,93	0,14
	Feijão Roxo		24	7,69	0,30
	Filé de Salmão		14	22,87	0,01
	Amêndoa		1	58,10	0,53
	Abóbora Cabotian	Lanche	3	4,80	0,25
	Óleo de Girassol		3	88,40	0,40
	Caqui		1	7,13	0,18

Fonte: Elaboração própria

Tabela 14. Soluções candidatas destacadas na Figura 12, considerando dois alimentos fixos.

Com alimentos fixos, o sistema se adapta e consegue apresentar resultados esperados, apresentando as soluções não-dominadas como uma boa aproximação da fronteira de Pareto.

Repare que o sistema empregou uma escolha estratégica interessante de seleção de alimentos e de suas quantidades. Essa estratégia se repetiu nos dois casos de estudo. Quando um alimento possui um custo baixo e/ou possui pouca quantidade de nutrientes, o algoritmo Gurobi explora a quantidade deste alimento para atender o objetivo, no nível inferior, de maximizar a energia. Apesar de que muita quantidade pode prejudicar o cálculo do objetivo de *Concentração* da solução

candidata, no nível superior, ela pode favorecer o objetivo *custo*; e isso afeta na seleção de indivíduos do algoritmo NSGA-II. Isso pode ser observado nos resultados E e G na Tabela 14, em que o segundo alimento tem quantidade elevada (Bebida Pêssego e iogurte de Morango).

Outro aspecto relevante a ser evidenciado aqui é que, durante a busca, o *so/ver* Gurobi apresentava diversos avisos de que a solução candidata era inatível. Trata-se de um importante indicativo de que o conjunto de restrições é exigente e não pode ser atendido por qualquer combinação de alimentos.

Em cenários em que as restrições se mostram muito exigentes, é possível aplicar funções de flexibilidade básicas, onde a ferramenta pode modificar os limites das restrições responsáveis pela inviabilidade da proposta de solução candidata. De fato, a ferramenta tem vários módulos estruturados para melhorar as decisões de flexibilização, mas este tipo de funcionalidade foge ao escopo do presente trabalho.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O problema da dieta alimentar vem sendo muito estudado há várias décadas, a partir de formulações diversas e empregando estratégias de solução tão diversas quanto. Mesmo em suas formulações mais simples, a sua solução requer o emprego de recursos computacionais significativos, não sendo viável o seu tratamento a partir de cálculos manuais. As razões dessa complexidade estão: (1) nas relações intrincadas entre as demandas por nutrientes especificadas pelas dietas (supõe-se que essas dietas são definidas por profissionais da área de nutrição) e a composição nutricional dos alimentos; (2) na existência de múltiplas restrições e condições de contorno a serem atendidas simultaneamente, dificultando inclusive a obtenção de soluções factíveis; (3) na necessidade de se otimizarem múltiplos objetivos conflitantes, o que impede a existência de uma única solução que otimize os múltiplos objetivos simultaneamente.

A evolução tecnológica vem disponibilizando o acesso a informações cada vez mais avançadas e vem criando usuários cada vez mais exigentes. Esse cenário é muito favorável ao desenvolvimento de sistemas de recomendação personalizados, sendo este o foco de contribuição deste trabalho. O problema da dieta foi concebido e modelado como um problema de otimização multiobjetivo e binível, envolvendo a solução de um problema multiobjetivo combinatório (via NSGA-II), no nível superior, e de um problema de programação linear associado (via Gurobi), no nível inferior. Na literatura, considerando abordagens multiobjetivo, geralmente o problema da dieta é tratado ou apenas no nível superior, atribuindo ao algoritmo evolutivo a missão de definir também a quantidade ótima de cada alimento, ou apenas no nível inferior, supondo que o conjunto de alimentos em cada refeição já está previamente definido. Sendo assim, mesmo havendo décadas de investigações junto ao problema da dieta, com um amplo escopo de formulações alternativas e técnicas de solução, a proposta aqui apresentada se diferencia por explicitar simultaneamente as naturezas multiobjetivo e binível do problema da dieta, conduzindo a uma proposta de solução escalável e flexível.

Houve um esforço significativo na integração do NSGA-II e do Gurobi, a qual se mostrou válida e viável computacionalmente, conduzindo a um elenco de soluções eficientes em variados cenários experimentais. A forma eficaz com que o

fluxo de dados do sistema foi concebido e implementado também representou uma importante contribuição desta pesquisa, pois devem ser coletadas informações provenientes de várias tabelas nutricionais, de um amplo elenco de categorias alimentares, de múltiplas restrições impostas pela dieta e de outras condições de contorno a serem atendidas pelas soluções candidatas, como filtros impondo a presença ou ausência de certos itens alimentares.

Dispondo de soluções factíveis que aproximam bem a fronteira de Pareto, bem espalhadas ao longo de sua extensão, representando assim vários *trade-offs* entre os objetivos, o beneficiário da dieta pode aplicar preferências a posteriori na escolha do cardápio mais interessante a ser adotado em seu dia-a-dia.

Como perspectivas futuras, temos a adaptação da formulação aqui apresentada para lidar com outras unidades atômicas que não diretamente os alimentos individuais, por exemplo, considerando receitas culinárias que envolvem múltiplos alimentos em sua composição, em proporções bem específicas. Como exemplos temos pratos populares como risotos, tortas e massas. Além disso, pretende-se implementar os preços de mercado dos alimentos, seja para valor unitário, seja para custo de preparo, uma vez que foram adotados aqui custos arbitrários.

O Gurobi dispõe de estratégias avançadas para a flexibilização de restrições, as quais podem ser consideradas, futuramente, em cenários de dietas muito restritivas e que criam problemas de factibilidade para as soluções candidatas.

É evidente que esta formulação multiobjetivo e binível para o problema da dieta pode ser prontamente adaptada a outros cenários de otimização igualmente desafiadores, como a especificação de treinos personalizados em academias e de planos de ensino em plataformas de ensino à distância.

Também faz parte de um planejamento a médio prazo a transformação do produto desta pesquisa em um aplicativo de apoio aos profissionais da área de nutrição, o que vai requerer o desenvolvimento de interfaces de entrada-saída amigáveis.

Todos os códigos e dados estão disponíveis para futuras pesquisas acadêmicas:

<<https://github.com/Otragal/Multiobjective-Bilevel-Recommendation-System>>.

REFERÊNCIAS

- ANVISA. **Rotulagem Nutricional Obrigatória**. Ministério da Saúde, Universidade de Brasília, 2005. Disponível em: <<http://antigo.anvisa.gov.br/documents/33916/389979/Rotulagem+Nutricional+Obrigat%C3%B3ria+Manual+de+Orienta%C3%A7%C3%A3o+%C3%A0s+Ind%C3%BAstrias+de+Alimentos/ae72b30a-07af-42e2-8b76-10ff96b64ca4?version=1.0#page=27&zoom=auto,-194,580>>. Acesso no dia 13 de Março de 2021.
- AMIN, Saman Hassanzadeh, MULLIGAN-GOW, Samantha, GUOQING, Zhang. **Selection of Food Items for Diet Problem Using a Multi-objective Approach Under Uncertainty**. Intechopen, 2019. Disponível: <<https://www.intechopen.com/books/application-of-decision-science-in-business-and-management/selection-of-food-items-for-diet-problem-using-a-multi-objective-approach-under-uncertainty>>. Acesso no dia 18 de Setembro de 2020.
- BAO, Pham Ngo Gia; QUAN, Tram Loi; THO, Quan Thanh; GARG, Akhil. **NSGA-II**. Ho Chi Minh University of Technology, 2018. Disponível em: <<https://github.com/baopng/NSGA-II>>. Acesso no dia 15 de Julho de 2021.
- BÄCK, Thomas., FOGEL, David B. & MICHALEWICZ, Zbigniew. **“Evolutionary Computation 1: Basic Algorithms and Operators”**, Institute of Physics Publishing, 2000.
- BARBOSA, Geraldo Magela. **Utilização da Programação Linear na Otimização de Resultados de Produção na Empresa**. Universidade São Judas, São Paulo. 2014.
- BARRÉ, Tanguy; PERIGNON, Marlène; et al. **Integrating Nutrient Bioavailability and Co-production Links When Identifying Sustainable diets: How low should we reduce meat consumption?**. McMaster University, CANADA. 2018.
- BEUME, Nicola; NAUJOKS, Naujoks; EMMERICH, Michael. **SMS-EMOA: Multiobjective Selection Based on Dominated Hypervolume**. European Journal of Operational Research, 2006.
- CANADA. **Dietary Reference Intakes**. Government of Canada, 2010. Disponível em: <<https://www.canada.ca/en/health-canada/services/food-nutrition/healthy-eating/dietary-reference-intakes.html>> . Acesso no dia 17 de Fevereiro de 2021.
- CALLE, Paul. **NSGA-II explained**. Analytics lab @ OU, 2017. Disponível em: <<http://oklahomaanalytics.com/data-science-techniques/nsga-ii-explained/>>. Acesso no dia 15 de Julho de 2021.
- CAVALLARO, Fausto. **A Takagi-Sugeno Fuzzy Inference System for Developing a Sustainability Index of Biomass**. Sustainability, 2015.

- CARVALHO, Leonardo Barcha de. **Otimização Multiobjetivo em Problema de Rota de Compras**. Unicamp, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2014.
- CASTRO, Josué de. **Geografia da Fome**. 10 ed. Rio de Janeiro, Edições Antares, 1984.
Disponível em:
<https://o-geografo.webnode.com.br/_files/200000097-d07dcd177a/Jos%C3%BAe%20de%20Castro%20Geografia%20da%20Fome.pdf>. Acesso no dia 18 de Abril de 2022.
- CEDERHOLM et al. **ESPEN guidelines on definitions and terminology of clinical nutrition**. Clinical Nutrition, vol. 36, pp. 49-64, 2017.
- COELLO, Carlos A. **Evolutionary Multi-Objective Optimization: A Historical View of The Field**. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006.
- DEB, Kalyanmoy. **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms: An Introduction**. Indian Institute of Technology Kanpur, 2011.
- DEB, Kalyanmoy; PRATAP, Amrit; AGARWAL, Sameer; MEYARIVAN, T. **A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II**. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, 2002.
- DOOREN, C Van. **A Review of the Use of Linear Programming to Optimize Diets, Nutritiously, Economically and Environmentally**, Frontiers in Nutrition, vol. 5, 48 pages, 2018.
- EVERT et al. **Nutrition Therapy for Adults With Diabetes or Prediabetes: A Consensus Report**, Diabetes Care, vol. 42, no. 5, pp. 731-754, 2019.
- FERREIRA, Esteffany Menezes. **Sistema de Recomendação Multimodal e Multiobjetivo Para Dietas Alimentares**. Unicamp, PIBIC, 2017.
- GASS, S.I; HARRIS, C.M.. **Stigler's Diet Problem**. Encyclopedia of Operations Research and Management Science, New York, NY, 2001.
- GUROBI. **Documentation**. Gurobi Optimization, 2021. Disponível em:
<<https://www.gurobi.com/documentation/>>. Acesso no dia 03 de Janeiro de 2021.
- IBGE. **Portal da Saúde, datasus**. Ministério da Saúde, 2021. Disponível em:
<<http://www2.datasus.gov.br/DATASUS/index.php>>. Acesso no dia 13 de Março de 2021.
- JARDIM, Júlia Gazzoni; VIEIRA, Ricardo Augusto Mendonça; FERNANDES, Alberto Magno; ARAUJO, Raphael Pavesi; GLÓRIA, Leonardo Siqueira; JÚNIOR, Nardele Moreno Rohem; ROCHA, Norberto Silva; ABREU, Matheus Lima Correa. **Application of a Nonlinear Optimization Tool to Balance Diets With Constant Metabolizability**. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2013.
- KALDIRIM, Elif; KOSE, Zekeriya. **Application Of A Multi-Objective Genetic Algorithm To The Modified Diet Problem**. Istanbul Technical University, 2006.

- LIU, Risheng; GAO, Jiabin; ZHANG, Jin; MENG, Deyu; LIN, Zhouchen. **Investigating Bi-Level Optimization for Learning and Vision from a Unified Perspective: A Survey and Beyond**. Journal of Latex, Cornell University, 2015.
- MENDES, João Batista. **Uma Abordagem Multiobjetivo Para o Problema de Despacho de Caminhões em Minas a Céu Aberto**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.
- MIRJALILI, Seyedali. **Genetic Algorithm**. In: **Evolutionary Algorithms and Neural Networks**. Studies in Computational Intelligence, vol 780, 2019. Editora: Springer, Cham.
- MS. **Guia Alimentar Para a População Brasileira**. Ministério da Saúde, 2004. Disponível em: <https://cursosextensao.usp.br/pluginfile.php/47411/mod_resource/content/1/Orienta%C3%A7%C3%B5es%20Guia%20Alimentar.pdf>. Acesso no dia 13 de Maio de 2021.
- MUTHEE, Arthur. **The Basics of Genetic Algorithms in Machine Learning**. Section, 2021. Disponível em: <<https://www.section.io/engineering-education/the-basics-of-genetic-algorithms-in-ml/>>. Acesso no dia 24 de Novembro de 2021.
- MYFITNESSPAL, **Perca peso com o MyFitnessPal.com**. *MyFitnessPal, Inc*, 2022. Disponível em: <https://www.myfitnesspal.com/pt/welcome/learn_more>. Acesso no dia 20 de Março de 2022.
- NCBI. **Dietary Reference Intakes**. *National Center for Biotechnology Information, US*, 2011. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>>. Acesso no dia 11 de Maio de 2020.
- NEPA. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos**. Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação, 2011. Disponível em: <https://www.cfn.org.br/wp-content/uploads/2017/03/taco_4_edicao_ampliada_e_revisada.pdf>. Acesso no dia 04 de Fevereiro de 2021.
- NUTRIGENIE. **Nutrition Software for Better Health**. *Stanford University, US*, 1991. Disponível em: <<http://nutrigenie.biz/about.html>>. Acesso no dia 20 de Março de 2022.
- OBITKO, Marek. **Introduction to Genetic Algorithms**. Universidade de Ciências Aplicadas de Dresden, 1998. Disponível em: <<https://www.obitko.com/tutorials/genetic-algorithms/index.php>>. Acesso no dia 27 de Novembro de 2021.

- OLIVEIRA, Ricardo; CALDEIRA, Jefferson; TRATTNER, Christoph; MARINHO, Leandro Balby. Healthy Menus Recommendation: **Optimizing the Use of the Pantry. Conference: Workshop on Health Recommender Systems**, Canada, 2018. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/328450699_Healthy_Menus_Recommendation_Optimizing_the_Use_of_the_Pantry>. Acesso no dia 02 de Dezembro de 2021.
- PATIL, Amol Nayakappa; KASTURI, Sidharth. **Optimal Diet Decision Using Linear Programming**. International Research Journal of Engineering and Technology, 2016.
- RAIMUNDO, Marcos Medeiros. **Uma Extensão Para o Problema de Roteamento e Estoque**. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Unicamp, 2014.
- RESZELEWSKI, Wojciech; MIELNIK, Kamil. **NSGA-II**. Github, 2016. Disponível em:
<<https://github.com/wreszelewski/nsga2>>. Acesso no dia 15 de Julho de 2021.
- SÁ, João Luiz da Silva. **A Fome No Brasil: Do Período Colonial Até 1940**. Revista de Geografia, 2006. Disponível em:
<<https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/228669>>. Acesso no dia 24 de Janeiro de 2021.
- SANTOS, Quenia dos; SICHIERI, Rosely; DARMON, Nicole, MAILLOT, Malthieu; JUNIOR, Eliseu Verly-. **Food Choice to Meet Nutrient Recommendations for the Adult Brazilian Population Based on the Linear Programming Approach**. *Public Health Nutrition*, Cambridge University Press (CUP), 2018.
- SINHA, A., MALO, P., DEB, K. **A Review on Bilevel Optimization: From Classical to Evolutionary Approaches and Applications**, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 22, no. 2, pp. 276-295, 2018.
- SOMMERVILLE, Ian. **Engenharia de Software**. Pearson Education do Brasil, 9ª Edição, 2011.
- SKLAN, David; DARIEL, Ilana. **Diet Planning For Humans Using Mixed-Integer Linear Programming**. Faculty of Agriculture, Hebrew University, 1992.
- UPS. **Algoritmos Genéticos**. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo, 2021. Disponível em:
<<https://sites.icmc.usp.br/andre/research/genetic/>>. Acesso no dia 20 de Novembro de 2021.
- UAB. **PerfectBody - Frequently Asked Questions - What is a Perfect Body Nutrition plan?** UAB “Kilo Group”, 2022. Disponível em: <<https://perfectbody.me/faq>>. Acesso no dia 21 de Março de 2022.

- USP. **Algoritmos Genéticos.** USP, 2021. Disponível em: <<https://sites.icmc.usp.br/andre/research/genetic/>>. Acesso no dia 13 de Maio de 2021.
- VASCONCELOS, Francisco de Assis Guedes de. **Josué de Castro e a Geografia da Fome no Brasil.** FÓRUM, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/csp/v24n11/27.pdf>>. Acesso no dia 1 de Abril de 2021.
- VELDHUIZEN, David A. Van. **Multiobjective Evolutionary Algorithms: Classifications, Analyses and New Innovations.** Air Force Institute of Technology, 1999. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA364478>>. Acesso no dia 8 de Abril de 2021.
- VIEUX, Florent; MAILLOT, Malthieu; RHEM, Colin D.; DREWNOWSKI, Adam. **Designing Optimal Breakfast for the United States Using Linear Programming and NHANES 2011-2014 Database. A Study from the International Breakfast Research Initiative (IBRI).** Breakfast Research Initiative (IBRI). *Nutrients*, 2019.
- WHO. **Obesity.** World Health Organization, 2021. Disponível em: <<https://www.who.int/health-topics/obesity>, 2021>. Acesso no dia 2 de Dezembro de 2021.
- ZHENKUI, Pei; ZHEN, Liu. **Nutritional Diet Using Multi-Objective Difference Evolutionary Algorithm.** International Conference On Computational Intelligence and Natural Computing, 2009.
- ZITZLER, Eckart; LAUMANN, Marco; THIELE, Lothar. **SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm,** Technical Report ETH Zürich, 2001.

ANEXOS

Anexo 1. Tabela TACO4 - Categoria Cereais

Tabela retirada de (NEPA, 2011), contendo todos os alimentos, e seus nutrientes, que foram considerados como “cereal”.

Nº	Nome /100g	Umidade (%)	Energia (kcal)	Energia (KJ)	Proteína (g)	Lípidos (g)	Colesterol (mg)	Carboidrato (g)	Fibra Alimentar (g)	Cinzas (g)	Ca (mg)	Mg (mg)	Mn (mg)	P (mg)	Fe (mg)	Na (mg)	K (mg)	Cu (mg)	Zn (mg)	Retinol (mcg)	RE (mcg)	RAE (mcg)	Tiamina (mg)	Riboflavina (mg)	Piridoxina (mg)	Niacina (mg)	Vitamina C (mg)
1	Arroz, integral, cozido	70.1	124	517	2.6	1.0	0	25.8	2.7	0.5	5	59	0.63	106	0.3	1	75	0.02	0.7	0			0.08	0.01	0.08	0.01	
2	Arroz, integral, cru	12.2	360	1505	7.3	1.9	0	77.5	4.8	1.2	8	110	2.99	251	0.9	2	173	0.07	1.4	0			0.26	0.01	0.18	4.18	
3	Arroz, tipo 1, cozido	69.1	128	537	2.5	0.2	0	28.1	1.6	0.1	4	2	0.30	18	0.1	1	15	0.02	0.5	0			0.01	0.01	0.01	0.01	
4	Arroz, tipo 1, cru	13.2	358	1497	7.2	0.3	0	78.8	1.6	0.5	4	30	1.03	104	0.7	1	62	0.11	1.2	0			0.16	0.01	0.07	1.12	
5	Arroz, tipo 2, cozido	68.7	130	544	2.6	0.4	0	28.2	1.1	0.1	3	6	0.37	22	0.1	2	20	0.04	0.5	0			0.01	0.01	0.01	0.01	
6	Arroz, tipo 2, cru	13.2	358	1498	7.2	0.3	0	78.9	1.7	0.4	5	29	0.83	82	0.6	1	57	0.05	1.3	0			0.16	0.01	0.05	0.92	
7	Aveia, flocos, crua	9.1	394	1648	13.9	8.5	0	66.6	9.1	1.8	48	119	1.89	153	4.4	5	336	0.44	2.6	0			0.55	0.03	0.01	4.47	1.4
8	Biscoito, doce, maisena	3.2	443	1853	8.1	12.0	0	75.2	2.1	1.5	54	37	0.78	166	1.8	352	142	0.17	1.0	0			1.01	0.42	0.23	3.91	6.2
9	Biscoito, doce, recheado com chocolate	2.2	472	1974	6.4	19.6	0	70.5	3.0	1.3	27	48	0.59	139	2.3	239	232	0.27	1.0	0			0.32	0.39	0.46	2.52	3.5
10	Biscoito, doce, recheado com morango	2.7	471	1971	5.7	19.6	0	71.0	1.5	1.0	36	27	0.66	138	1.5	230	113	0.13	0.7	0			0.90	0.42	0.21	1.50	0.0

24	Cereais, mistura para vitamina, trigo, cevada e aveia	4.4	381	1595	8.9	2.1	0	81.6	5.0	3.0	584	72	2.28	515	12.6	1163	244	0.21	2.0	0			0.76	0.88	1.49	7.46	13.1
25	Cereal matinal, milho	5.5	365	1529	7.2	1.0	0	83.8	4.1	2.5	143	11	0.06	101	3.1	655	83	0.06	7.6	0	31	15	0.76	1.02	2.25	11.04	17.3
26	Cereal matinal, milho, açúcar	4.3	377	1576	4.7	0.7	0	88.8	2.1	1.5	56	8	0.13	43	3.9	405	52	0.04	8.5	0	31	15	0.73	1.11	0.79	10.1 3	14.6
27	Creme de arroz, pó	7.3	386	1615	7.0	1.2	0	83.9	1.1	0.5	7	51	1.24	153	0.6	1	115	0.04	1.9	0			0.22	0.01	0.05	0.01	0.0
28	Creme de milho, pó	5.7	333	1393	4.8	1.6	0	86.1	3.7	1.7	323	30	0.20	303	4.3	594	166	0.04	0.8	0			0.74	0.01	2.05	0.01	96.3
29	Curau, milho verde	81.6	78	328	2.4	1.6	5	13.9	0.5	0.5	53	16	0.06	75	0.4	21	162	0.03	0.4	12	20	16	0.04	0.07	0.01	0.01	0.0
30	Curau, milho verde, mistura para	3.9	402	1683	2.2	13.4	0	79.8	2.5	0.7	31	9	0.05	45	0.9	223	55	0.03	0.2	0			0.13	0.01	0.01	0.01	0.0
31	Farinha, de arroz, enriquecida	12.7	363	1519	1.3	0.3	0	85.5	0.6	0.2	1	4	0.04	36	31.4	17	13	0.01	8.5	0			3.23	0.01	3.47	24.4 2	173. 6
32	Farinha, de centeio, integral	10.8	336	1405	12.5	1.8	0	73.3	15.5	1.7	34	120	3.86	340	4.7	41	334	0.56	2.7	0			0.29	0.03	0.08	0.01	0.0
33	Farinha, de milho, amarela	11.8	351	1467	7.2	1.5	0	79.1	5.5	0.5	1	31	0.01	84	2.3	45	58	0.27	0.6	0	18	9	0.25	0.01	0.25	0.01	0.0
34	Farinha, de rosca	9.8	371	1550	11.4	1.5	0	75.8	4.8	1.6	35	57	1.62	195	6.7	333	212	0.26	1.7	0			0.25	0.01	0.09	0.01	0.0
35	Farinha, de trigo	13.0	360	1508	9.8	1.4	0	75.1	2.3	0.8	18	31	0.46	115	1.0	1	151	0.15	0.8	0			0.31	0.01	0.01	0.89	0.0
36	Farinha, láctea, de cereais	2.7	415	1736	11.9	5.8	11	77.8	1.9	1.9	196	58	1.49	296	8.7	125	366	0.19	1.7	492			1.43	1.13	1.14	9.50	24.3

37	Lasanha, massa fresca, cozida	59.6	164	685	5.8	1.2	0	32.5	1.6	0.9	10	4	0.20	42	1.2	207	54	0.07	0.4	0			0.04	0.01	0.01	3.96	
38	Lasanha, massa fresca, crua	45.0	pyt	922	7.0	1.3	0	45.1	1.6	1.6	17	13	0.34	82	1.9	667	137	0.10	0.8	0			0.08	0.01	0.01	0.01	
39	Macarrão, instantâneo	6.0	436	1824	8.8	17.2	0	62.4	5.6	5.6	18	19	0.25	112	0.8	1516	148	0.10	0.5	0			1.18	0.04	0.53	9.37	0.0
40	Macarrão, trigo, cru	10.2	371	1553	10.0	1.3	0	77.9	2.9	0.5	17	28	0.53	100	0.9	7	147	0.15	0.8	0			0.18	0.02	0.01	3.57	0.0
41	Macarrão, trigo, cru, com ovos	10.6	371	1550	10.3	2.0	18	76.6	2.3	0.5	19	0	0.40	118	0.9	15	134	0.14	0.8	0			0.11	0.05	0.03	4.37	0.0
42	Milho, amido, cru	12.2	361	1512	0.6	0.0	0	87.1	0.7	0.1	1	3	0.02	13	0.1	8	9	0.02	0.1	0			0.01	0.01	0.01	0.01	0.0
43	Milho, fubá, cru	11.5	353	1479	7.2	1.9	0	78.9	4.7	0.6	3	41	0.34	108	0.9	0	168	0.08	1.1	0	26	13	0.25	0.01	0.01	0.75	0.0
44	Milho, verde, cru	63.5	138	578	6.6	0.6	0	28.6	3.9	0.7	2	33	0.12	113	0.4	1	185	0.05	0.5	0	32	16	0.30	0.01	0.04	0.01	0.0
45	Milho, verde, enlatado, drenado	76.2	98	408	3.2	2.4	0	17.1	4.6	1.1	2	20	0.09	61	0.6	260	162	0.05	0.5	0	48	24	0.01	0.05	0.01	3.74	1.7
46	Mingau tradicional, pó	8.1	373	1562	0.6	0.4	0	89.3	0.9	1.6	522	4	0.01	273	42.0	15	0	0.01	15.2	1533			3.41	0.01	3.11	19.39	0.0
47	Pamonha, barra para cozimento, pré-cozida	61.3	171	716	2.6	4.8	0	30.7	2.4	0.6	4	15	0.12	55	0.4	132	125	0.03	0.4	0			0.01	0.01	0.01	0.01	0.0
48	Pão, aveia, forma	19.9	343	1435	12.4	5.7	0	59.6	6.0	2.5	109	57	1.08	182	4.7	606	210	0.14	1.7	0			0.09	0.03	0.08	0.01	0.0
49	Pão, de soja	26.0	309	1292	11.3	3.6	0	56.5	5.7	2.5	90	48	0.57	153	3.3	663	296	0.16	1.5	0			0.07	0.04	0.79	0.01	0.0
50	Pão, glúten, forma	40.7	253	1059	12.0	2.7	0	44.1	2.5	0.5	156	24	0.51	105	5.7	22	65	0.06	1.3	0			0.04	0.03	0.01	0.01	0.0
51	Pão, milho, forma	30.4	292	1222	8.3	3.1	6	56.4	4.3	1.8	78	29	0.37	110	3.0	507	89	0.10	0.8	0			0.08	0.01	0.08	0.01	0.0

52	Pão, trigo, forma, integral	34.7	253	1059	9.4	3.7	0	49.9	6.9	2.3	132	60	1.62	193	3.0	506	163	0.15	1.6	0			0.08	0.04	0.15	0.01	0.0
53	Pão, trigo, francês	28.5	300	1254	8.0	3.1	0	58.6	2.3	1.8	16	25	0.46	95	1.0	648	142	0.13	0.8	3			0.39	0.67	0.60	2.34	
54	Pão, trigo, sovado	25.8	311	1301	8.4	2.8	17	61.5	2.4	1.5	52	22	0.31	101	2.3	431	91	0.01	2.7	0			0.08	0.04	0.15	0.01	0.0
55	Pastel, de carne, cru	34.4	289	1208	10.7	8.8	18	42.0	1.0	4.1	17	18	0.34	117	2.0	1309	166	0.11	1.7	0			0.06	0.03	0.01	1.58	0.0
56	Pastel, de carne, frito	22.9	388	1625	10.1	20.1	25	43.8	1.0	3.1	13	14	0.22	90	2.5	1040	156	0.12	1.2	0			0.06	0.05	0.01	1.83	
57	Pastel, de queijo, cru	31.3	308	1291	9.9	9.6	14	45.9	1.1	3.3	155	16	0.24	168	1.0	985	103	0.10	1.0	0			0.07	0.03	0.01	0.01	0.0
58	Pastel, de queijo, frito	17.5	422	1766	8.7	22.7	15	48.1	0.9	2.9	126	15	0.20	124	1.3	821	124	0.10	0.8	18			0.09	0.04	0.01	0.01	0.0
59	Pastel, massa, crua	27.1	310	1298	6.9	5.5	0	57.4	1.4	3.2	13	14	0.38	73	1.1	1344	167	0.11	0.6	0			0.15	0.01	0.01	0.01	
60	Pastel, massa, frita	1.0	570	2384	6.0	40.9	0	49.3	1.3	2.8	11	13	0.36	62	1.4	1175	143	0.08	0.5	0			0.16	0.01	0.01	0.01	
61	Pipoca, com óleo de soja, sem sal	2.8	448	1876	9.9	15.9	0	70.3	14.3	1.0	3	91	0.65	225	1.2	4	256	0.46	2.0	0			0.03	0.03	0.01	0.01	0.0
62	Polenta, pré-cozida	72.7	103	430	2.3	0.3	0	23.3	2.4	1.4	1	4	0.01	17	0.0	442	100	0.04	0.1	0			0.04	0.01	0.01	0.01	0.0
63	Torrada, pão francês	9.0	377	1579	10.5	3.3	0	74.6	3.4	2.6	19	32	0.55	114	1.2	829	189	0.16	0.9	0			0.38	0.01	0.01	0.01	0.0

Anexo 2. Tabelas de Recomendações Diárias

Duas tabelas do (NCBI, 2021), que apresentam os valores dos nutrientes recomendados do consumo humano em diferentes tipos de grupos de vida.

Life Stage Group	Calcium (mg/d)	Chromium (µg/d)	Copper (µg/d)	Fluoride (mg/d)	Iodine (µg/d)	Iron (mg/d)	Magnesium (mg/d)	Manganese (mg/d)	Molybdenum (µg/d)	Phosphorus (mg/d)	Selenium (µg/d)	Zinc (mg/d)	Potassium (g/d)	Sodium (g/d)	Chloride (g/d)
Infants															
0–6_mo	200*	0.2*	200*	0.01*	110*	0.27*	30*	0.003*	2*	100*	15*	2*	0.4*	0.12*	0.18*
6–12 mo	260*	5.5*	220*	0.5*	130*	11	75*	0.6*	3*	275*	20*	3	0.7*	0.37*	0.57*
Children															
1–3 y	700	11*	340	0.7*	90	7	80	1.2*	17	460	20	3	3.0*	1.0*	1.5*
4–8 y	1,000	15*	440	1*	90	10	130	1.5*	22	500	30	5	3.8*	1.2*	1.9*
Males															
9–13 y	1,300	25*	700	2*	120	8	240	1.9*	34	1,250	40	8	4.5*	1.5*	2.3*
14–18 y	1,300	35*	890	3*	150	11	410	2.2*	43	1,250	55	11	4.7*	1.5*	2.3*
19–30 y	1,000	35*	900	4*	150	8	400	2.3*	45	700	55	11	4.7*	1.5*	2.3*
31–50 y	1,000	35*	900	4*	150	8	420	2.3*	45	700	55	11	4.7*	1.5*	2.3*
51–70 y	1,000	30*	900	4*	150	8	420	2.3*	45	700	55	11	4.7*	1.3*	2.0*
> 70 y	1,200	30*	900	4*	150	8	420	2.3*	45	700	55	11	4.7*	1.2*	1.8*
Females															
9–13 y	1,300	21*	700	2*	120	8	240	1.6*	34	1,250	40	8	4.5*	1.5*	2.3*
14–18 y	1,300	24*	890	3*	150	15	360	1.6*	43	1,250	55	9	4.7*	1.5*	2.3*

19–30 y	1,000	25*	900	3*	150	18	310	1.8*	45	700	55	8	4.7*	1.5*	2.3*
31–50 y	1,000	25*	900	3*	150	18	320	1.8*	45	700	55	8	4.7*	1.5*	2.3*
51–70 y	1,200	20*	900	3*	150	8	320	1.8*	45	700	55	8	4.7*	1.3*	2.0*
> 70 y	1,200	20*	900	3*	150	8	320	1.8*	45	700	55	8	4.7*	1.2*	1.8*
Pregnancy															
14–18 y	1,300	29*	1,000	3*	220	27	400	2.0*	50	1,250	60	12	4.7*	1.5*	2.3*
19–30 y	1,000	30*	1,000	3*	220	27	350	2.0*	50	700	60	11	4.7*	1.5*	2.3*
31–50 y	1,000	30*	1,000	3*	220	27	360	2.0*	50	700	60	11	4.7*	1.5*	2.3*
Lactation															
14–18 y	1,300	44*	1,300	3*	290	10	360	2.6*	50	1,250	70	13	5.1*	1.5*	2.3*
19–30 y	1,000	45*	1,300	3*	290	9	310	2.6*	50	700	70	12	5.1*	1.5*	2.3*
31–50 y	1,000	45*	1,300	3*	290	9	320	2.6*	50	700	70	12	5.1*	1.5*	2.3*

Life Stage Group	Vitamin A (µg/d)a	Vitamin C (mg/d)	Vitamin D (µg/d)b,c	Vitamin E (mg/d)d	Vitamin K (µg/d)	Thiamin (mg/d)	Riboflavin (mg/d)	Niacin (mg/d)e	Vitamin B6 (mg/d)	Folate (µg/d)f	Vitamin B12 (µg/d)	Pantothenic Acid (mg/d)	Biotin (µg/d)	Choline (mg/d)g
Infants														
0–6 mo	400*	40*	10*	4*	2.0*	0.2*	0.3*	2*	0.1*	65*	0.4*	1.7*	5*	125*
6–12 mo	500*	50*	10*	5*	2.5*	0.3*	0.4*	4*	0.3*	80*	0.5*	1.8*	6*	150*
Children														
1–3 y	300	15	15	6	30*	0.5	0.5	6	0.5	150	0.9	2*	8*	200*
4–8 y	400	25	15	7	55*	0.6	0.6	8	0.6	200	1.2	3*	12*	250*
Males														

9–13 y	600	45	15	11	60*	0.9	0.9	12	1	300	1.8	4*	20*	375*
14–18 y	900	75	15	15	75*	1.2	1.3	16	1.3	400	2.4	5*	25*	550*
19–30 y	900	90	15	15	120*	1.2	1.3	16	1.3	400	2.4	5*	30*	550*
31–50 y	900	90	15	15	120*	1.2	1.3	16	1.3	400	2.4	5*	30*	550*
51–70 y	900	90	15	15	120*	1.2	1.3	16	1.7	400	2.4h	5*	30*	550*
> 70 y	900	90	20	15	120*	1.2	1.3	16	1.7	400	2.4h	5*	30*	550*
Females														
9–13 y	600	45	15	11	60*	0.9	0.9	12	1	300	1.8	4*	20*	375*
14–18 y	700	65	15	15	75*	1	1	14	1.2	400i	2.4	5*	25*	400*
19–30 y	700	75	15	15	90*	1.1	1.1	14	1.3	400i	2.4	5*	30*	425*
31–50 y	700	75	15	15	90*	1.1	1.1	14	1.3	400i	2.4	5*	30*	425*
51–70 y	700	75	15	15	90*	1.1	1.1	14	1.5	400	2.4h	5*	30*	425*
> 70 y	700	75	20	15	90*	1.1	1.1	14	1.5	400	2.4h	5*	30*	425*
Pregnancy														
14–18 y	750	80	15	15	75*	1.4	1.4	18	1.9	600j	2.6	6*	30*	450*
19–30 y	770	85	15	15	90*	1.4	1.4	18	1.9	600j	2.6	6*	30*	450*
31–50 y	770	85	15	15	90*	1.4	1.4	18	1.9	600j	2.6	6*	30*	450*
Lactation														
14–18 y	1,200	115	15	19	75*	1.4	1.6	17	2	500	2.8	7*	35*	550*
19–30 y	1,300	120	15	19	90*	1.4	1.6	17	2	500	2.8	7*	35*	550*
31–50 y	1,300	120	15	19	90*	1.4	1.6	17	2	500	2.8	7*	35*	550*

NOTE: This table (taken from the DRI reports, see www.nap.edu) presents Recommended Dietary Allowances (RDAs) in bold type and Adequate Intakes (AIs) in ordinary type followed by an asterisk (*). An RDA is the average daily dietary intake level sufficient to meet the nutrient requirements of nearly all (97–98 percent) healthy individuals in a group. It is calculated from an Estimated Average Requirement (EAR). If sufficient scientific evidence is not available to establish an EAR, and thus calculate an RDA, an AI is usually developed. For healthy breast-fed infants, an AI is the mean intake. The AI for other life stage and gender groups is believed to cover the needs of all healthy individuals in the groups, but lack of data or uncertainty in the data prevent being able to specify with confidence the percentage of individuals covered by this intake.

a

As retinol activity equivalents (RAEs). 1 RAE = 1 µg retinol, 12 µg β-carotene, 24 µg α-carotene, or 24 µg β-cryptoxanthin. The RAE for dietary provitamin A carotenoids is two-fold greater than retinol equivalents (REs), whereas the RAE for preformed vitamin A is the same as RE.

b

As cholecalciferol. 1 µg cholecalciferol = 40 IU vitamin D.

c

Under the assumption of minimal sunlight.

d

As α-tocopherol. α-tocopherol includes RRR-α-tocopherol, the only form of α-tocopherol that occurs naturally in foods, and the 2R-stereoisomeric forms of α-tocopherol (RRR-, RSR-, RRS-, and RSS-α-tocopherol) that occur in fortified foods and supplements. It does not include the 2S-stereoisomeric forms of α-tocopherol (SRR-, SSR-, SRS-, and SSS-α-tocopherol), also found in fortified foods and supplements.

e

As niacin equivalents (NE). 1 mg of niacin = 60 mg of tryptophan; 0–6 months = preformed niacin (not NE).

f

As dietary folate equivalents (DFE). 1 DFE = 1 µg food folate = 0.6 µg of folic acid from fortified food or as a supplement consumed with food = 0.5 µg of a supplement taken on an empty stomach.

g

Although AIs have been set for choline, there are few data to assess whether a dietary supply of choline is needed at all stages of the life cycle, and it may be that the choline requirement can be met by endogenous synthesis at some of these stages.

h

Because 10 to 30 percent of older people may malabsorb food-bound B12, it is advisable for those older than 50 years to meet their RDA mainly by consuming foods fortified with B12 or a supplement containing B12.

i

In view of evidence linking folate intake with neural tube defects in the fetus, it is recommended that all women capable of becoming pregnant consume 400 µg from supplements or fortified foods in addition to intake of food folate from a varied diet.

j

It is assumed that women will continue consuming 400 µg from supplements or fortified food until their pregnancy is confirmed and they enter prenatal care, which ordinarily occurs after the end of the periconceptual period—the critical time for formation of the neural tube.

Anexo 3. Publicação vinculada a esta pesquisa

POCHMANN, Vítor O.; VON ZUBEN, Fernando J. “Multi-Objective Bilevel Recommender System for Food Diets”, Congress on Evolutionary Computation (CEC’2022), as part of the World Congress on Computational Intelligence (WCCI’2022), trabalho aceito para publicação.