UMA ABORDAGEM MULTI-OBJETIVO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE CARDÁPIOS VOLTADA PARA ESCOLAS DE ENSINO BÁSICO DE MINAS GERAIS

Bárbara Milagres, Dayanne Coelho, Daiane Braga e Pedro Silva
Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto
Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil
barbara.leticia@aluno.ufop.edu.br,dayanne@ufop.edu.br,
daiane.braga@aluno.ufop.edu.br,silvap@ufop.edu.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é gerar um conjunto de cardápios para escolas de ensino básico em Minas Gerais, utilizando o Problema da Dieta Multi-objetivo, o algoritmo NSGA-II e a estratégia Épsilon-Restrito, visando minimizar o custo e o erro nutricional das refeições, atendendo às necessidades nutricionais de adolescentes de 11 a 15 anos. A base de dados consistiu em 97 alimentos, com valores nutricionais obtidos da Tabela Brasileira de Composição dos Alimentos, e os custos dos alimentos foram calculados considerando o valor médio praticado por supermercados de varejo do Brasil. A metodologia proposta foi capaz de gerar conjuntos de soluções não-dominadas para o problema, onde cada ponto representa uma solução entre os objetivos considerados, e as dietas geradas atenderam a todos os valores nutricionais recomendados pelas referências consultadas.

PALAVRAS CHAVE. Problema da Dieta, NSGA-II, Épsilon-Restrito.

ABSTRACT

The objective of this paper is to generate a set of menus for elementary schools from Minas Gerais, using Multi-objective Diet Problem, the NSGA-II algorithm and the Épsilon Constraint, seeking to minimize cost and nutritional error of meals, providing the nutricional needs for teenagers of ages 11 to 15. The database consists of 97 foods, with nutritional needs obtained from the *Tabela Brasileira de Composição dos Alimentos*, and the foods costs were calculated taking into account the average amount practiced by brazilian retail markets. The proposed method was able to generate sets of non-dominated solutions for the problem, where each point represents a solution among the pondered goals, and the achieved diets met all nutritional values recommended by the relevant references.

KEYWORDS. Diet Problem. NSGA-II. Épsilon Constraint.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174921
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174921

1. Introdução

A desnutrição é caracterizada por uma condição patológica causada por ingestão deficiente ou inadequada de calorias e/ou proteínas [Nunes, 2001], podendo afetar a aprendizagem da criança e até mesmo o ato de conhecer o novo. Conforme explorado por Frota et al. [2009], crianças e adolescentes que possuem uma má alimentação apresentam dificuldades de concentração, problemas com coordenação motora e dificuldades na formulação do conhecimento.

Durante décadas, políticas públicas voltadas para a oferta de alimentação escolar foram criadas com o intuito de promover hábitos alimentares saudáveis. O programa mais recente é conhecido como [Programa Nacional de Alimentação Escolar – PNAE, 2009] cujo objetivo é combater, no país, os altos índices de desnutrição e de doenças associadas às comorbidades alimentares pelos estudantes [Brasil e Brasil, 2011]. Para alguns alunos, que vivem em situação de pobreza, a alimentação escolar é considerada a principal refeição saudável do dia, principalmente em regiões vulneráveis [Costa et al., 2001].

Neste contexto, justifica-se a criação de estratégias que busquem por cardápios que sejam baratos, nutritivos e que ajudem nesse combate à fome e à desnutrição nas escolas públicas. Para tanto, é considerado o almoço como sendo uma refeição que atenda a aproximadamente 35% dos requisitos nutricionais mínimos diários para uma criança [Ramos-Pérez et al., 2020].

O Problema da Dieta clássico, proposto por Stigler [1945], buscava gerar dietas para o exército Americano que fossem nutricionalmente adequadas e com o menor custo possível. A formulação inicial proposta não considerava a palatabilidade da dieta gerada, o que dificultava colocar os resultados gerados em prática. Variações do problema foram aplicadas a diversas áreas, como no planejamento de dietas para animais [Soleimani e Gilbert, 2021].

Balintfy [1964] formulou o Problema de Planejamento de Cardápios (MPP, do inglês *Menu Planning Problem*) por meio de um modelo que é uma extensão do modelo clássico do problema da dieta. Basicamente, o MPP é o problema da dieta estendido que busca criar cardápios com duas ou mais refeições [Spak et al., 2017].

O estudo proposto por Moreira et al. [2022] trata de uma variação do MPP que visa gerar dietas para crianças em idade pré-escolar em cinco dias da semana. Moreira et al. [2022] tem por objetivo minimizar o custo das refeições e o erro nutricional.

Neste contexto, o presente estudo tem por objetivo gerar cardápios para escolas públicas de ensino básico do estado de Minas Gerais, que auxiliem no combate à desnutrição, que possuam o menor custo e menor erro nutricional possíveis, assim como em Moreira et al. [2022]. O cálculo do erro nutricional é realizado por meio da soma das diferenças entre o valor do nutriente presente na solução corrente e o valor de referência obtido a partir do Programa Nacional de Alimentação Escolar – PNAE [2009]. Os cardápios gerados devem ser nutricionalmente adequados de acordo com as necessidades nutricionais de um adolescente do Ensino Fundamental 2 em idade escolar de 11 a 15 anos, para um total de cinco dias, logo, pretende-se gerar cinco refeições diferentes em um único cardápio. Como os objetivos de minimização do custo e minimização do erro nutricional tendem a ser conflitantes, neste trabalho será tratada a versão multi-objetivo do MPP.

Assim, este trabalho está dividido da seguinte forma: na Seção 2 são apresentados os trabalhos relacionados; a abordagem proposta e os experimentos executados são apresentados nas Seções 3 e 4 respectivamente; por fim, as conclusões e trabalhos futuros são descritos na Seção 5.

2. Trabalhos relacionados

Na literatura, existem diversas estratégias que lidam com o problema da dieta. São usados desde programação linear inteira até algoritmos genéticos. Por exemplo, Silva et al. [2017] propõem minimizar as calorias e maximizar as proteínas. O algoritmo utilizado para resolução deste problema

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174921
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174921

é o GDE3 (do inglês *Generalized Differential Evolution Algorithm*) além da utilização do Método de Penalidade Adaptativo (do inglês *Adaptive Penalty Method*, APM) para violação de restrições. Hernández et al. [2019] visaram fornecer dietas de acordo com o padrão mediterrâneo que possuam o menor custo e obtenham soluções o mais próximas possível de uma solução corrente fornecida. Para a resolução do problema utilizou-se o EGP (*Extended Goal Programming*) para explorar o conjunto de dietas viáveis que estão mais próximas aos hábitos alimentares da população e uma combinação MGP (*Minmax Goal Programming*) e *weighted Tchebychef metric* (WTM) gerando um conjunto mais amplo de soluções para o problema da dieta.

O estudo proposto por Porras et al. [2019] pretendeu encontrar uma combinação de alimentos para adultos com custo mínimo de restrições violadas. Para a resolução do problema, Porras et al. [2019] utilizaram o algoritmo *Particle Swarm Optimization* - PSO. Chen et al. [2019] visaram minimizar a diferença entre a ingestão de nutrientes recomendada e a ingestão real de nutrientes e o custo. Para a resolução do problema foi proposto um algoritmo, MOEA-NDD (*Multi-Objective Evolutionary Algorithm - Nutritional Dietary Decision*) baseado no MOEA-DLA (*Multi-Objective Evolutionary Algorithm with Double-Level Archives*) e no problema de decisão nutricional dietética (do inglês, *Nutritional Dietary Decision Problem* - NDDP).

Delinski et al. [2019] propôs a geração de cardápios com o menor preço possível, mínimo de colesterol e máximo de preferências dos estudantes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). O modelo proposto foi baseado em [Balintfy et al., 1978] e utilizou-se métodos exatos para a resolução do problema. O trabalho proposto por Ramos-Pérez et al. [2020] forneceu planos alimentares saudáveis e equilibrados para grandes grupos de crianças nas cantinas escolares, buscando minimizar o custo e o grau de repetição dos pratos e grupos de alimentos que compõem os cardápios, havendo também a aplicação de penalidades para a violação de restrições. Foram utilizados os algoritmos NSGA-II, SPEA2 (do inglês *Strength Pareto Evolutionary Algorithm*) e IBEA (do inglês *Indicator-based Evolutionary Algorithm*).

O estudo proposto por Segredo et al. [2020] antecede ao apresentado em [Ramos-Pérez et al., 2020]. Os objetivos, público-alvo e as restrições do problema são os mesmos, a diferença é a utilização apenas do NSGA-II para resolução do problema em [Segredo et al., 2020]. Marrero et al. [2020] buscaram gerar cardápios saudáveis, equilibrados e acessíveis para cantinas de escolas regionais nas Ilhas Canárias. Além disso, visaram minimizar o custo da refeição e o nível de repetição dos grupos de alimentos nos cardápios gerados. Para resolução do problema, foi utilizado um algoritmo que é, basicamente, o MOEA/D (do inglês *Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition*) com uma extensão do ILS (Busca Local Iterada, do inglês *Iterated Local Search*) aplicada ao MA (Algoritmo Memético, do inglês *Memetic Algorithm*), sendo este algoritmo é denominado ILS-MOEA/D.

O estudo apresentado em Abejón et al. [2020a] teve por finalidade definir padrões alimentares sustentáveis em conformidade com questões nutricionais, ambientais e econômicas. Especificamente, seus objetivos foram a maximização do índice nutricional e minimização dos índices ambientais e econômicos. Para resolução do problema foi utilizada uma abordagem, baseada em Abejón et al. [2020b], de distância ao alvo (do inglês *distance to target*) [Abejón et al., 2020a].

Em Türkmenoğlu et al. [2021] os objetivos do problema proposto foram minimizar o custo e tempo de preparo e maximizar a preferência. Foi utilizado como algoritmo o NSGA-III (do inglês *Nondominated Sorting Genetic Algorithm III*) para obtenção dos resultados.

Por fim, o estudo proposto por Moreira et al. [2022] verificou a geração de cardápios destinados a crianças em idade pré-escolar, com 4 e 5 anos, contemplando cinco dias da semana e três refeições diárias: café da manhã, almoço e lanche da tarde. Nesse contexto, buscou-se minimizar

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174921
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174921

o custo das refeições e o erro nutricional, que é a soma das diferenças entre o valor médio dos nutrientes a serem consumidos e os nutrientes presentes na refeição gerada. Para atingir estas metas, foram estabelecidas restrições relacionadas à cor, consistência, variedade, limite de custo e limite de erro nutricional das refeições. O problema foi resolvido mono-objetivo e multi-objetivo, utilizando o método da soma ponderada com algoritmos genéticos e o NSGA-II, respectivamente. Este trabalho, dentro da literatura, é o que apresenta a maior similaridade com o estudo proposto aqui, sendo semelhante o público-alvo, o ambiente em que o estudo foi aplicado e objetivos do problema.

Observa-se que, em trabalhos que utilizam métodos heurísticos, o algoritmo mais utilizado é o NSGA-II. Ele apresentou melhores resultados para este tipo de estudo. Em [Ramos-Pérez et al., 2020], o NSGA-II é o algoritmo que apresentou melhores resultados para o problema MPP com um menor número de dias. Além disso, [Moreira et al., 2022] aplicaram o NSGA-II a um problema semelhante ao deste trabalho, o que justificou o seu uso neste trabalho. Para contextualizar os objetivos abordados neste trabalho, utilizou-se os mesmos objetivos apresentados por [Moreira et al., 2022] que foram aplicados em crianças em idade escolar.

3. Abordagem proposta

Com o objetivo de encontrar soluções para o problema em questão, foi implementado o algoritmo multi-objetivo *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm - II* (NSGA-II) e a estratégia Épsilon-Restrito. Esta seção apresenta os procedimentos implementados em detalhes.

Os alimentos utilizados nesse trabalho foram obtidos a partir da cartilha de Cardápios da Alimentação Escolar da Secretaria de Estado de Educação de Minas Gerais [Minas Gerais, 2021]. A cartilha visa seguir as exigências do Programa Nacional de Alimentação Escolar – PNAE do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação, disponível em [de Desenvolvimento da Educação, 2020]. A definição dos cortes de carnes a serem utilizados foi baseada no trabalho proposto por Delinski et al. [2019] que selecionou os cortes mais baratos do mercado. As receitas dos alimentos preparados são definidas na própria cartilha. As informações de custo e valores nutricionais dos alimentos utilizados neste estudo estão disponíveis na plataforma GitHub no link: https://github.com/BarbaraLeticiaRM/ProblemaDePlanejamentoDeCardapios.

Para obtenção dos dados nutricionais, usou-se a Tabela Brasileira de Composição dos Alimentos - TBCA [de São Paulo USP e FoRC, 2022] que vem sendo desenvolvida desde 2013 de forma integrada entre a Rede Brasileira de Dados de Composição de Alimentos (Brasilfoods), Universidade de São Paulo (USP) e *Food Research Center* (FoRC/CEPID/FAPESP). Para este estudo foram selecionados 97 alimentos de diferentes grupos. Para avaliar as recomendações nutricionais do ser humano, o presente trabalho considerou os seguintes nutrientes: energia, carboidratos, proteínas, cálcio, ferro, magnésio, zinco, vitamina A e vitamina C. Os nutrientes considerados são os mesmos considerados pelo PNAE para as refeições escolares. Os valores mínimos e máximos de consumo diário desses nutrientes, com exceção da energia, foram obtidos a partir da *Dietary Reference Intakes* - DRI [Meyers et al., 2006]. A DRI apresenta valores energéticos e nutricionais para seres humanos, que são geralmente utilizados, por exemplo, em rótulos de produtos alimentícios [Delinski et al., 2019].

A DRI descrimina os valores nutricionais de acordo com o sexo e com a idade. No caso da idade, neste trabalho são considerados estudantes do ensino fundamental 1 que possuem entre 11 e 15 anos, os grupos de idade utilizados foram de 9 a 13 anos e de 14 a 18 anos. Para o cálculo dos valores, utilizou-se a média dos valores mínimos e máximos dos grupos considerados. Segundo Ramos-Pérez et al. [2020], o almoço deve atender à 35% das necessidades nutricionais diárias. Na Tabela 1 são apresentados os valores nutricionais diários necessários e os necessários para o almoço.

A energia foi obtida a partir do *Recommended Dietary Allowances* [Council et al., 1989].

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174921
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174921

Nutrientes	Quantidade diária		Quantidade almoço	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Carboidratos (g)	130	-	45,5	-
Proteínas (g)	41,5	-	14,53	-
Cálcio (mg)	1300	2500	455	875
Ferro (mg)	10,5	42,5	3,68	14,88
Magnésio (mg)	312,5	-	109,38	-
Zinco (mg)	9	28,5	3,15	9,9
Vitamina A (mcg)	700	2250	245	787,5
Vitamina C(mg)	57,5	1500	20,13	525

Tabela 1: Valores nutricionais necessários ao ser humano na faixa etária de 11 a 15 anos entre quantidade diária e a quantidade no almoço.

A média diária de energia para meninos de 9 a 13 anos é de 2500 kcal e para meninos de 14 a 18 anos é de 3000 kcal. Para meninas o valor é o mesmo para ambos grupos de idade, 2200 kcal. Para chegar ao valor final foi calculada primeiro a média para os meninos, que é de 2750 kcal e, por fim, a média entre meninos e meninas, que é de 2475 kcal diárias em média. Para uma refeição que atenda a 35% das necessidades diárias de energia, foi calculado 35% da média dos valores de meninos e meninas, e o valor final foi de 866 kcal.

O tamanho das porções de alimento para geração do cardápio de cada dia da semana foram consideradas porções de 100g por ser o valor médio presente na cartilha Minas Gerais [2021]. Os grupos de alimentos considerados foram: saladas 1 e 2, acompanhamentos 1 e 2, prato proteico e guarnição.

As saladas 1 e 2 são diferentes. Os acompanhamentos 1 e 2 referem-se aos tipos de arroz e feijão, respectivamente. É importante destacar que eles não são fixos, pois podem ser preparados de diferentes maneiras, o grupo do arroz pode conter arroz branco, arroz colorido, entre outros. Enquanto que o grupo do feijão pode conter feijão carioca, feijoada, entre outros.

Outro ponto importante deste trabalho são os preços dos alimentos que são usados como um dos objetivos. Os valores foram obtidos a partir de mercados de varejo do Brasil, desconsiderando o custo de preparo. Foi considerado o preço dos alimentos crus. Para o caso de pratos preparados com vários alimentos foram consideradas as receitas apresentadas na cartilha de Cardápios da Alimentação Escolar [Minas Gerais, 2021], que já possuem as quantidades, em gramas, de cada alimento presente na receita. A partir disso, calculou-se o preço do prato de acordo com o preço individual da quantidade de cada alimento da receita.

Outro objetivo deste trabalho consiste em minimizar o erro nutricional por meio da utilização do módulo da soma das diferenças entre a referência nutricional, obtida a partir do Programa Nacional de Alimentação Escolar – PNAE [2009], e o valor nutricional da solução em curso. Tal objetivo se fundamenta no estudo proposto por Moreira et al. [2022].

As referências nutricionais para crianças na faixa etária das séries escolares, incluindo aquelas com idades entre 11 e 15 anos, foram obtidos a partir de referências da Organização Mundial da Saúde - OMS - e do Instituto de Medicina - IOM -, conforme descrito no Programa Nacional de Alimentação Escolar – PNAE [2009]. Estes valores foram utilizados como base para o cálculo do erro nutricional. Na Tabela 2 estes valores são apresentados para a faixa etária considerada.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174921
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174921

Nutriente	Dia (100%)	Almoço (35%)
Energia(kcal)	2175	761,25
Proteínas(g)	67,97	23,79
Ferro(mg)	13	4,55
Zinco(mg)	10	3,5
Vitamina C (mg)	70	24,5

Nutriente	Dia (100%)	Almoço (35%)
Carboidratos(g)	353,43	123,7
Cálcio(mg)	1300	455
Magnésio(mg)	385	134,75
Vitamina A (mcg)	800	280

Tabela 2: Referências nutricionais para adolescentes de 11 a 15 anos conforme apresentado em Programa Nacional de Alimentação Escolar – PNAE [2009].

3.1. Modelo Matemático

A modelagem matemática do problema proposto foi baseada na modelagem proposta no trabalho de Delinski et al. [2019] e Moreira et al. [2022] e é apresentada a seguir:

$$Minimizar \sum_{i=1}^{C}\sum_{j=1}^{M} c_j x_{ij} \tag{1}$$

$$Minimizar \left| \sum_{k=1}^{O}\sum_{j=1}^{M} n_{kj} x_{ij} - m_k \right| \tag{2}$$

$$Sujeito\ a:$$

$$\sum_{k=1}^{O}\sum_{j=1}^{P} n_{ijk} x_{ij} \geq N_{min} \quad \forall i \in \{1,\ldots,C\} \tag{3}$$

$$\sum_{k=1}^{O}\sum_{j=1}^{P} n_{ijk} x_{ij} \leq N_{max} \quad \forall i \in \{1,\ldots,C\} \tag{4}$$

$$i = \{1, 2, ..., C\}$$
$$j = \{1, 2, ..., M\}$$
$$k = \{1, 2, ..., O\}$$

onde:

i representa cada um dos C cardápios a serem gerados (para este trabalho $C = 5$);
j corresponde a cada um dos M alimentos de uma solução para um total de 5 dias ou P alimentos para uma solução de um dia apenas;
k representa cada um dos O nutrientes utilizados no trabalho;
x_{ij} representa se o alimento j no cardápio i faz parte da solução;
c_j corresponde ao custo do alimento j;
m_k representa o valor referência do nutriente k;
n_{kj} é a quantidade do nutriente k no alimento j;
n_{ijk} é a quantidade do nutriente k no alimento j em todos i cardápios;
N_{min} é a quantidade mínima do nutriente k;
N_{max} é a quantidade máxima do nutriente k.

A função objetivo dada pela Equação (1), tem como critério minimizar o custo e, a outra função objetivo, dada pela Equação (2), tem por objetivo minimizar o erro nutricional para os cinco dias propostos. As restrições utilizadas na formulação do problema garantem, respectivamente, que os nutrientes não sejam menores que o mínimo recomendado diariamente, Equação (3), e os nutrientes não ultrapassem o máximo recomendado diariamente, Equação (4).

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174921
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174921

3.2. Algoritmo NSGA-II

Para realização da primeira parte dos experimentos foi utilizado o algoritmo NSGA-II com base no arcabouço *Multi-objective Optimization in Python - Pymoo* [Blank e Deb, 2020].

A solução do problema é apresentada a partir de um vetor de inteiros que contem 30 posições, sendo 5 refeições contendo 6 grupos de alimentos diferentes, sendo eles: duas saladas, dois acompanhamentos, guarnição e prato proteico. Para cada grupo foi definido um limite inferior e superior que definem entre quais posições da tabela de alimentos o grupo se encontra. A Figura 1 apresenta a estrutura do vetor solução do problema, cada cor representa um grupo de alimentos e o vetor completo é a solução do problema.



Figura 1: Representação de uma solução para o problema onde cada cor representa um grupo de alimentos. A cor vermelha representa as saladas, laranja o acompanhamento 1, amarelo o acompanhamento 2, verde a guarnição e azul o prato proteico.

A polução inicial foi gerada aleatoriamente, respeitando o grupo do alimento. Para o cruzamento (*crossover*) que é recombinação aleatória dos indivíduos e produz seus descendentes com a troca de fragmentos de sequências de cromossomos [Desuky et al., 2022], foi utilizado o *Single-point Crossover* [Desuky et al., 2022] por se tratar de um método simples e fácil de ser aplicado. Ele seleciona um ponto de cruzamento aleatório e os filhos gerados são a concatenação da primeira parte de um pai com a última parte do outro pai.

O operador de mutação empregado consiste em selecionar uma pequena porcentagem de indivíduos da população para ter seu material genético mutado. No caso da mutação utilizada, os indivíduos que sofrem mutação têm apenas um cromossomo aleatório modificado, com a escolha do cromossomo também feita de maneira aleatória mas respeitando o grupo do alimento.

O operador de seleção utilizado foi o padrão do NSGA-II presente no *framework Pymoo*: seleção binária de acasalamento de torneios (*binary tournament mating selection*). Cada indivíduo é primeiro comparado por classificação na Fronteira de Pareto e, em seguida, distância de aglomeração.

Além disso, o algoritmo implementado possui quatro parâmetros importantes: o número de gerações, que envolve o número de iterações do algoritmo; o tamanho da população, que envolve a quantidade total de indivíduos; a taxa de cruzamento, que envolve a taxa de probabilidade do cruzamento acontecer; e a taxa de mutação, que envolve a taxa de probabilidade da mutação ocorrer.

O critério de parada, na maioria dos casos, depende do tamanho do problema a ser resolvido. Neste trabalho, o critério de parada no NSGA-II utilizado foi o número de gerações do algoritmo.

3.3. Estratégia Épsilon-Restrito

A Estratégia do Épsilon-Restrito foi implementada utilizando a coleção de ferramentas Python-MIP [Santos e Toffolo, 2020], desenvolvida para a modelagem e solução de programas lineares inteiros mistos. A função focal na execução do algoritmo foi a minimização do custo das refeições, enquanto o erro nutricional se juntou às restrições do problema.

A obtenção do valor do épsilon máximo se deu a partir dos experimentos utilizando o NSGA-II. Considerou-se a média dos maiores erros nutricionais encontrados a partir de 30 execuções do algoritmo. Enquanto que para a obtenção do épsilon entre uma solução e outra, considerou-se 1% do erro nutricional máximo pois é a média da quantidade de soluções encontradas pelo NSGA-II nas 30 execuções.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174921
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174921

4. Experimentos e Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pela abordagem proposta. Para realização dos experimentos, foram utilizados 97 alimentos e para cada alimento foi atribuído um valor de custo. Foram considerados também, a nível de restrições, 9 nutrientes, sendo eles: energia, carboidratos, proteínas, cálcio, ferro, magnésio, zinco, vitamina A e vitamina C. Os nutrientes considerados são os mesmos considerados pelo PNAE para as refeições escolares.

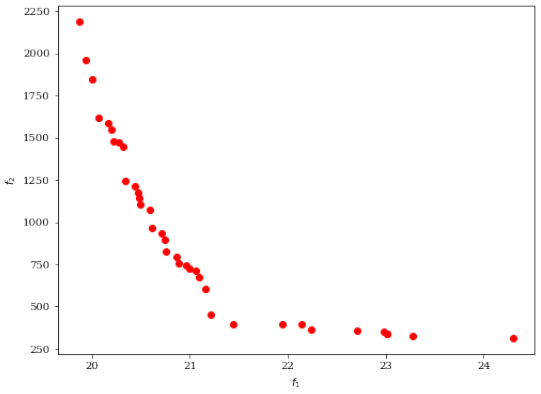
Alguns parâmetros diferentes foram testados no Algoritmo NSGA-II para resolver o problema proposto. Contudo, os parâmetros utilizados no trabalho de Moreira et al. [2022] serviram de base para os experimentos executados. Utilizou-se o número de indivíduos como 100, o número de gerações como 1.000, probabilidade de cruzamento e mutação de 80% e 5% respectivamente.

As soluções podem variar muito entre uma execução e outra, devido à natureza estocástica do algoritmo NSGA-II. Por se tratar de um problema multi-objetivo, sua solução não é dada por apenas um ponto mas sim por um conjunto de soluções não dominadas.

4.1. Conjunto de Soluções Não-Dominadas geradas (NSGA-II)

A Figura 2 evidencia o subconjunto de soluções não dominadas gerada para 1.000 gerações do algoritmo NSGA-II, onde $f1$ representa a função objetivo que minimiza o custo dos alimentos e a $f2$ representa a função objetivo que minimiza o erro nutricional.

Figura 2: Conjunto de Soluções Não Dominadas de um cardápio para 5 dias, minimizando o custo da refeição ($f1$), e o erro nutricional, ($f2$), obtida ao executar o algoritmo NSGA-II



A curva apresentada na Figura 2 representa a melhor curva obtida, levando em conta o melhor hiper-volume dentre todas as curvas obtidas ao executar o algoritmo 30 vezes, assim como feito por Moreira et al. [2022]. A solução apresentada na Figura 2 possui um total de 37 soluções.

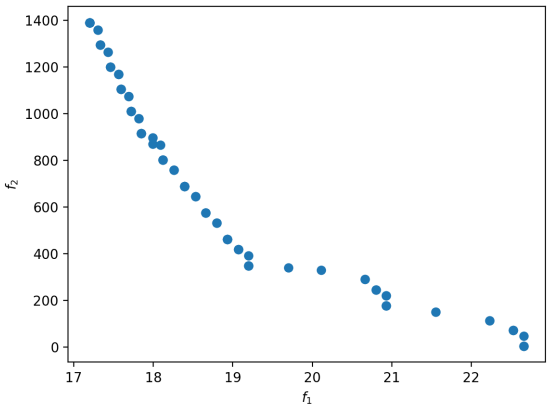
4.2. Conjunto Pareto Ótimo

A Figura 3 apresenta a curva de Pareto obtida ao rodar o algoritmo Épsilon-Restrito, onde $f1$ representa a função objetivo que minimiza o custo dos alimentos e a $f2$ representa a função objetivo que minimiza o erro nutricional.

A curva apresentada na Figura 3 trata-se da curva Pareto Ótima para o problema, dada a forma como o problema foi resolvido: utilizou-se o solver de programação linear inteira mista Cbc *(Coin-or branch and cut)*, o qual leva à solução ótima. Como o algoritmo teve um tempo de execução elevado, não foi possível realizar testes exaustivos para encontrar o épsilon. Foi considerado valor máximo de épsilon sendo 1500, que equivale a média dos maiores erros nutricionais encontrados a partir das 30 execuções do algoritmo NSGA-II. E o épsilon entre uma solução e outra sendo 15, que equivale a 1% do máximo, valor escolhido pois é próximo da média da quantidade de soluções encontradas pelas execuções do NSGA-II.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174921
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174921

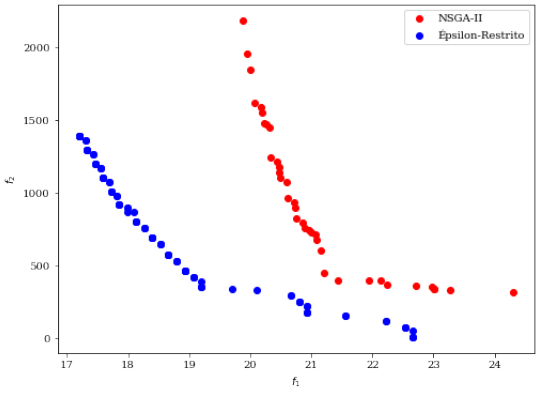
Figura 3: Conjunto de Pareto Ótimo de um cardápio para 5 dias, minimizando o custo da refeição ($f1$) e o erro nutricional ($f2$) obtida ao executar o algoritmo Épsilon-Restrito



4.3. Comparação dos resultados obtidos

A Figura 4 apresenta a curva de Pareto ótima obtida ao rodar o algoritmo Épsilon-Restrito e o conjunto de soluções não dominadas, obtida ao rodar o NSGA-II. Ao observar as curvas é possível observar que o Épsilon-Restrito domina todas as soluções do NSGA-II e também que chegou mais perto do erro nutricional 0.

Figura 4: Conjunto de Pareto Ótimo de um cardápio para 5 dias, minimizando o custo da refeição ($f1$) e o erro nutricional ($f2$) obtida ao executar o algoritmo Épsilon-Restrito



Para o cálculo do hiper-volume foi considerado o ponto $(40, 2000)$, o algoritmo NSGA-II obteve uma média de 21.886,81 para o volume dos hipercubos formados, sendo o valor máximo alcançado de 32.644,15 em 30 execuções. Em contraste, o algoritmo Épsilon-Restrito apresentou um desempenho superior, atingindo um valor de 43.037,64 para o mesmo ponto, o que é claramente uma melhor performance em relação ao NSGA-II. Ao realizar o cálculo da porcentagem GAP, o NSGA-II ficou aproximadamente 24% distante do Épsilon-Restrito.

Porém, foi identificado um problema relacionado à repetição de alimentos no plano alimentar proposto, principalmente na solução do Épsilon-Restrito. Observou-se que houve uma alta frequência de alimentos repetidos ao longo da semana, o que compromete a viabilidade e aplicabilidade da dieta proposta.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174921
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174921

Na Figura 4, é possível observar que tanto para o Conjunto Pareto Ótimo (em azul - obtido pela execução do Épsilon-Restrito), quanto para o conjunto de soluções não dominadas (em vermelho - obtido a partir da execução do NSGA-II), quanto menor for o erro nutricional maior será o custo da refeição, o que mostra que os objetivos são conflitantes.

4.4. Solução

O menor erro nutricional encontrado pelas 30 execuções do algoritmo NSGA-II foi de 312,09. Para essa solução, o preço total das cinco refeições foi de R$24,30, o que resulta em uma média de R$4,86 por refeição. Em comparação aos resultados do estudo proposto por Moreira et al. [2022], que compartilha os mesmos objetivos, o valor médio de custo é próximo, especialmente considerando a diferença entre os públicos-alvo, uma vez que o estudo [Moreira et al., 2022] envolve crianças de 4 a 5 anos, enquanto este trabalho envolve adolescentes de 11 a 15 anos que, devido à idade, consomem quantidades maiores de alimentos. No estudo de Moreira et al. [2022], há três refeições: café da manhã, almoço e lanche da tarde. Considerando somente o valor do almoço, que é a refeição analisada neste trabalho, o valor máximo é de R$4,00, um valor próximo ao valor médio obtido neste estudo.

O valor obtido para o menor erro nutricional ficou bastante próximo ao resultado encontrado por Moreira et al. [2022], o qual ficou em torno de 200. Considerando as diferenças nos cenários e nos nutrientes avaliados, pode-se afirmar que o resultado é viável.

No caso do Épsilon-Restrito, o menor erro nutricional encontrado foi de 3,69 com um preço total da refeição de R$22,66, resultando em uma média de R$4,53. Contudo, com muito mais repetições no cardápio.

Ao analisar os resultados obtidos pelo NSGA-II e pelo Épsilon-Restrito, foi possível observar que há uma grande quantidade de alimentos repetidos nos cardápios gerados. Esse resultado se deve ao fato de que o modelo implementado não inclui restrições para evitar a repetição de alimentos, o que deve ser tratado em trabalhos futuros. De fato, é desejável que os cardápios incluam uma variedade de alimentos além do tradicional arroz e feijão, e, portanto, a repetição excessiva pode não ser considerada ideal. Apesar disso, as dietas geradas são aplicáveis, pois atendem aos requisitos nutricionais e são palatáveis.

5. Considerações Finais

Este estudo teve como objetivo propor uma aplicação do Problema da Dieta Multi-objetivo para gerar um conjunto de cardápios destinados a escolas de ensino básico do estado de Minas Gerais. Para tal, foi utilizada uma formulação matemática baseada em estudos anteriores, como os de Delinski et al. [2019], Spak et al. [2017] e Moreira et al. [2022]. A proposta visou minimizar o custo e o erro nutricional das refeições, respeitando o consumo diário de nutrientes estabelecido no *Dietary Reference Intakes* (DRI) [Meyers et al., 2006]. O algoritmo genético multi-objetivo NSGA-II e a estratégia do Épsilon-Restrito foram utilizados para tratar o problema.

Os resultados mostraram que a abordagem proposta foi capaz de gerar um conjunto representativo de soluções não-dominadas para o algoritmo NSGA-II e o conjunto Pareto ótimo para o Épsilon-Restrito. Observou-se que a diminuição do custo do cardápio correspondeu ao aumento do erro nutricional. Cada solução do conjunto de soluções não-dominadas representou um possível conjunto de cardápios para cinco dias. As dietas geradas atenderam todos os valores nutricionais recomendados pelas referências consultadas. Porém, identificou-se como um dos problemas a elevada repetição de alimentos nas dietas geradas, o que não é desejável para o contexto em que o problema é aplicado.

Os resultados obtidos se mostraram viáveis, uma vez que o custo e o erro nutricional não foram elevados em comparação com o trabalho proposto em Moreira et al. [2022], além de atenderem

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174921
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174921

aos requisitos nutricionais estabelecidos. Foi possível gerar dietas saudáveis e de baixo custo. Como trabalhos futuros, visa-se avaliar o melhor valor de épsilon, adicionar restrições para diminuir a repetição dos alimentos e aplicar penalidades para violação de restrições.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP/PROPPI) por apoiar o desenvolvimento do presente estudo.

Referências

Abejón, R., Batlle-Bayer, L., Laso, J., Bala, A., Vazquez-Rowe, I., Larrea-Gallegos, G., Margallo, M., Cristobal, J., Puig, R., Fullana-i Palmer, P., et al. (2020a). Multi-objective optimization of nutritional, environmental and economic aspects of diets applied to the spanish context. Foods, 9(11):1677.

Abejón, R., Vázquez-Rowe, I., Bala, A., Fullana-i Palmer, P., Aldaco, R., et al. (2020b). Application of the "distance to target" approach to the multiobjective optimization of nutritional and economic costs due to food loss and waste. In Computer Aided Chemical Engineering, volume 48, p. 1681–1686. Elsevier.

Balintfy, J. L. (1964). Menu planning by computer. Communications of the ACM, 7(4):255–259.

Balintfy, J. L., Ross, G. T., Sinha, P., e Zoltners, A. A. (1978). A mathematical programming system for preference and compatibility maximized menu planning and scheduling. Mathematical Programming, 15 (1):63–76.

Blank, J. e Deb, K. (2020). pymoo: Multi-objective optimization in python. IEEE Access, 8:89497–89509.

Brasil, M. e Brasil (2011). Fundo nacional de desenvolvimento da educação (fnde). Secretaria de Educação Básica. Edital de convocação, 6.

Chen, X.-C., Wei, T.-R., Guo, J.-H., Zhou, W.-X., Song, A., Chen, W.-N., e Zhang, J. (2019). Multiobjective evolutionary algorithm with double-level archives for nutritional dietary decision problem. In 2019 9th International Conference on Information Science and Technology (ICIST), p. 419–426. IEEE.

Costa, E. d. Q., RIBEIRO, V. M. B., e RIBEIRO, E. C. d. O. (2001). Programa de alimentação escolar: espaço de aprendizagem e produção de conhecimento. Revista de Nutrição, 14:225–229.

Council, N. R. et al. (1989). Recommended dietary allowances. National Academies Press.

de Desenvolvimento da Educação, F. F. N. (2020). Pnae - programa nacional de alimentação escolar. URL `http://www.fnde.gov.br/index.php`. Acessado em: 29/09/2022.

de São Paulo USP, U. e FoRC, F. R. C. (2022). Tbca - tabela brasileira de composição de alimentos. `http://www.tbca.net.br/`. Versão 7.2 (Accessed on 08/29/2022).

Delinski, L. M. M. et al. (2019). Utilização da modelagem matemática multiobjetivo na geração de dieta para um restaurante universitário. Master's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Desuky, A. S., Elbarawy, Y. M., Kausar, S., Omar, A. H., e Hussain, S. (2022). Single-point crossover and jellyfish optimization for handling imbalanced data classification problem. IEEE Access, 10:11730–11749.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174921
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174921

Frota, M. A., Páscoa, E. G., Bezerra, M. D. M., Martins, M. C., e Gurgel, A. A. (2009). Má alimentação: fator que influencia na aprendizagem de crianças de uma escola pública. Revista de APS, 12(3).

Hernández, M., Gómez, T., Delgado-Antequera, L., e Caballero, R. (2019). Using multiobjective optimization models to establish healthy diets in spain following mediterranean standards. Operational Research, 21(3): 1927–1961.

Marrero, A., Segredo, E., León, C., e Segura, C. (2020). A memetic decomposition-based multi-objective evolutionary algorithm applied to a constrained menu planning problem. Mathematics, 8(11):1960.

Meyers, L. D., Hellwig, J. P., Otten, J. J., et al. (2006). Dietary reference intakes: the essential guide to nutrient requirements. National Academies Press.

Minas Gerais. Cardápios da alimentação escolar, 2021. Secretaria de Estado de Educação de Minas Gerais. Programa de Alimentação Escolar.

Moreira, R. P., Marcelino, C. G., Martins, F. V., Wanner, E. F., Jimenez-Fernandez, S., e Salcedo-Sanz, S. (2022). A multi-objective approach for the menu planning problem: A brazilian case study. In Optimization, Learning Algorithms and Applications: Second International Conference, OL2A 2022, Póvoa de Varzim, Portugal, October 24-25, 2022, Proceedings, p. 275–290. Springer.

Nunes, M. L. (2001). Desnutrição e desenvolvimento neuropsicomotor.

Porras, E. M., Fajardo, A. C., e Medina, R. P. (2019). Solving dietary planning problem using particle swarm optimization with genetic operators. In Proceedings of the 3rd international conference on machine learning and soft computing, p. 55–59.

Programa Nacional de Alimentação Escolar – PNAE (2009). Referências Nutricionais para o Programa Nacional de Alimentação Escolar.

Ramos-Pérez, J.-M., Miranda, G., Segredo, E., León, C., e Rodríguez-León, C. (2020). Application of multi-objective evolutionary algorithms for planning healthy and balanced school lunches. Mathematics, 9 (1):80.

Santos, H. G. e Toffolo, T. (2020). Mixed integer linear programming with python. COINOR Computational Infrastructure for Operations Research.

Segredo, E., Miranda, G., Ramos, J. M., León, C., e Rodríguez-León, C. (2020). Schoolthy: automatic menu planner for healthy and balanced school meals. IEEE Access, 8:113200–113218.

Silva, J. G. R., Bernardino, H. S., Barbosa, H. J. C., de Carvalho, I. A., da Fonseca Vieira, V., Loureiro, M. M. S., e Xavier, C. R. (2017). Solving a multiobjective caloric-restricted diet problem using differential evolution. In 2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), p. 2062–2069.

Soleimani, T. e Gilbert, H. (2021). An approach to achieve overall farm feed efficiency in pig production: environmental evaluation through individual life cycle assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 26(3):455–469.

Spak, M. D. S. et al. (2017). Aplicação da modelagem matemática para o planejamento de cardápios para restaurantes universitários. PhD thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Stigler, G. (1945). The cost of subsistence. Journal of Farm Economics, 27:303–314.

Türkmenoğlu, C., Etaner Uyar, A. Ş., e Kiraz, B. (2021). Recommending healthy meal plans by optimising nature-inspired many-objective diet problem. Health Informatics Journal, 27(1):1460458220976719.

DOI: 10.59254/sbpo-2023-174921
http://live-proceedings.pantheonsite.io/p/174921